



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 6. Publikácia - obnova 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 KPB4 s názvom Obnova budov

OBNOVA 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

Zoznam skratiek	6
Zoznam tabuliek	7
Zoznam obrázkov	8
1 Dekarbonizácia v procese obnovy budov – súčasný stav poznania	12
1.1 Znižovanie energetickej náročnosti	12
1.2 Elektrifikácia a prechod na obnoviteľné zdroje energie (OZE)	13
1.3 Zabudovaný uhlík	15
2 Inteligentné budovy a digitalizácia	18
3 Životný cyklus budov	20
3.1 Hodnotenie environmentálnych indikátorov	20
3.1.1 Definovanie cieľa a predmetu	20
3.1.2 Inventarizačná analýza	21
3.1.3 Posudzovanie vplyvov životného cyklu LCIA	22
3.1.4. Interpretácia životného cyklu	25
3.2 Hodnotenie ekonomických aspektov	25
3.3 Význam použitia LCA metódy pre dekarbonizáciu stavebníctva	28
3.4 Analýza dekarbonizačného potenciálu a ekonomických aspektov obnovy vybraných budov 29	
3.4.1 Metódy a materiály	29
3.4.2 Softvérové nástroje a dátové zdroje	30
4 Vegetačné strechy v procese obnovy budov	32
4.1 Klimatická zmena, urbanizácia a potreba obnovy existujúcich budov	32
4.2 Projekt greenIZOLA ako experimentálna platforma	33
4.3 Implementácia prvkov modrej a zelenej infraštruktúry v projekte greenIZOLA	35
4.4 Experimentálna vegetačná strecha s biodiverzným potenciálom	39
4.5 Meracia infraštruktúra a metodika monitoringu	43
4.6 Klimatické podmienky počas monitoringu	45
4.7 Tepelná odozva vegetačných striech v kontexte klimatických parametrov	47
4.7.1 Letné obdobie bez dažďa (17. – 23. jún 2021)	48
4.7.2 Letné daždivé obdobie (9. – 15. júl 2021)	49
4.7.3 Zimné obdobie (16. – 21. január 2021)	50
4.7.4 Zimné obdobie so snehovou pokrývkou (9. – 14. február 2021)	51
4.7.5 Zhrnutie	53
4.8 Medziročné porovnanie tepelnej odozvy vegetačných striech v zimnom období	55
4.9 Analýza hustoty tepelného toku vegetačných striech	59
4.10 Analýza tepelných strát vegetačných striech	63
4.11 Analýza environmentálnych dopadov variantov strešnej konštrukcie	68

4.12 Energetické, konštrukčné a environmentálne prínosy vegetačných striech pri obnove budov .	73
5 Rekonštrukcia základnej školy - analýza dekarbonizačného potenciálu a ekonomických aspektov	78
5.1 Inventarizačná analýza	78
5.2. Analýza vplyvov na životné prostredie	83
5.2.1 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Pôvodný stav)	83
5.2.2 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Scenár 1).....	86
5.2.3 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Scenár 2).....	87
5.2.4 Vyhodnotenie rozdielov pôvodného stavu, scenára 1 a scenára 2	88
5.2.5 Vyhodnotenie nákladov na životný cyklus	93
5.2.6 Výsledky, diskusia a komplexné zhodnotenie scenárov	96
5.2.7 Diskusia.....	97
6 Rekonštrukcia kultúrneho domu - analýza dekarbonizačného potenciálu a ekonomických aspektov.....	98
6.1 Inventarizačná analýza	98
6.2. Analýza vplyvov na životné prostredie	101
6.2.1 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov LCA (Pôvodný stav)	102
6.2.2 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Scenár 1).....	106
6.2.3 Vyhodnotenie rozdielov pôvodného stavu a scenára 1	109
6.2.4 Vyhodnotenie nákladov na životný cyklus	110
6.2.5 Výsledky, diskusia a komplexné zhodnotenie scenárov.....	112
6.2.6 Diskusia.....	114
7 Rozšírenie vzdelávacích kapacít základnej školy -analýza dekarbonizačného potenciálu a ekonomických aspektov.....	115
7.1 Inventarizačná analýza	115
7.2 Analýza vplyvov na životné prostredie.....	118
7.2.1 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Pôvodný stav)	119
7.2.2 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Scenár 1).....	120
7.2.3 Vyhodnotenie rozdielov pôvodného stavu a scenára 1	122
7.2.4 Vyhodnotenie nákladov na životný cyklus	126
7.2.5 Výsledky, diskusia a komplexné zhodnotenie scenárov.....	128
8 Rekonštrukcia kultúrneho domu - analýza dekarbonizačného potenciálu a ekonomických aspektov	130
8.1 Inventarizačná analýza	130
8.2 Analýza vplyvov na životné prostredie.....	137
8.2.1 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Pôvodný stav)	138
8.2.2 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Scenár 1).....	141
8.2.3 Vyhodnotenie rozdielov pôvodného stavu a scenára 1	144
8.2.4 Vyhodnotenie nákladov na životný cyklus	145

8.2.5	Výsledky, diskusia a komplexné zhodnotenie scenárov	147
8.2.6	Diskusia	149
9	Administratívna budova – analýza systémov s výrobou tepla na základe sledovania realizovaných opatrení a vyhodnocovania prevádzky	152
9.1	Postupnosť realizovaných opatrení	152
9.2	Vyhodnotenie realizovaných opatrení	155
10	Budovy pre školstvo - analýza školských objektov z hľadiska spotreby elektrickej energie počas prevádzky a sledovanie realizovaných opatrení	156
10.1	Ciele analýzy	156
10.2	Vyhodnotenie budov pre školstvo	160
11	Budovy na bývanie - analýza spotreby tepla na vykurovanie a ohrev teplej vody na prevádzku a sledovanie realizovaných opatrení	161
11.1	Cieľ analýzy	161
11.2	Úpravy na systéme vykurovania	162
11.3	Úpravy na systéme ohrevu teplej vody	163
11.4	Vplyv zateplenia na spotrebu tepla v obytných budovách	165
11.4	Vyhodnotenie budov na bývanie	182
12.	Dekarbonizačné stratégie pre obnovu budov	183
13	Záver	185

Zoznam skratiek

ADP-E	Potenciál abiotického vyčerpania zdrojov – prvky (Abiotic Depletion Potential – Elements)
ADP-FF	Potenciál abiotického vyčerpania fosílnych zdrojov (Abiotic Depletion Potential – Fossil Fuels)
CE	Cirkulárna ekonomika (Circular Economy)
CE-LCC	Model nákladov životného cyklu v cirkulárnej ekonomike (Circular Economy Life Cycle Costing)
C-LCC	Konvenčné náklady životného cyklu (Conventional Life Cycle Costing)
CO ₂	Oxid uhličitý
CO ₂ eq	Ekvivalent oxidu uhličitého
COP	Koeficient výkonu tepelného čerpadla (Coefficient of Performance)
E-LCC	Environmentálne náklady životného cyklu (Environmental Life Cycle Costing)
EP	Potenciál eutrofizácie
EPD	Environmentálne vyhlásenie o produkte (Environmental Product Declaration)
EPS	Expandovaný polystyrén
FU	Funkčná jednotka (Functional Unit)
GHG	Skleníkové plyny (Greenhouse Gases)
GWP	Potenciál globálneho otepľovania (Global Warming Potential)
GWP-biogénny	Potenciál globálneho otepľovania – biogénny
GWP-celkový	Celkový potenciál globálneho otepľovania
GWP-fosílny	Potenciál globálneho otepľovania – fosílny
GWP-GHG	Potenciál globálneho otepľovania skleníkových plynov
GWP-LULUC	Potenciál globálneho otepľovania spôsobený využívaním a zmenou využívania krajiny
LCA	Posudzovanie životného cyklu (Life Cycle Assessment)
LCC	Náklady životného cyklu (Life Cycle Costing)
LCI	Inventarizačná analýza životného cyklu (Life Cycle Inventory)
LCIA	Posudzovanie vplyvov životného cyklu (Life Cycle Impact Assessment)
LULUC	Využívanie krajiny a zmena využívania krajiny (Land Use and Land Use Change)
MaR	Meranie a regulácia
NMVOC	Nemetánové prchavé organické zlúčeniny
OCL	One Click LCA
ODP	Potenciál poškodzovania ozónovej vrstvy (Ozone Depletion Potential)
OZE	Obnoviteľné zdroje energie
PEF	Environmentálna stopa produktu (Product Environmental Footprint)
POCP	Potenciál tvorby fotochemického ozónu
RAL	Systém montáže okien podľa smerníc RAL
SO ₂	Oxid siričitý
SRI	Indikátor pripravenosti inteligentných budov (Smart Readiness Indicator)
TÚV	Teplá úžitková voda
WD	Nedostatok vody (Water Deprivation)
ŽB	Železobetón

Zoznam tabuliek

Tab. 3.1	Indikátory charakterizujúce hlavné vplyvy na životné prostredie	24
Tab. 4.1	Prehľad použitých meracích zariadení a monitorovaných veličín	44
Tab. 4.2	Charakteristiky povrchových teplôt nameraných v experimentálnych strechách počas letného horúceho a suchého obdobia (17. jún 2021 – 23. jún 2021)	48
Tab. 4.3	Charakteristiky povrchových teplôt nameraných v experimentálnych strechách počas letného horúceho a daždivého obdobia (9. júl 2021 – 15. júl 2021)	49
Tab. 4.4	Charakteristiky povrchových teplôt nameraných v experimentálnych strechách počas zimného chladného a suchého obdobia (16. január – 21. január 2021)	50
Tab. 4.5	Charakteristiky povrchových teplôt nameraných v experimentálnych strechách počas zimného chladného a zasneženého obdobia (9. február – 14. február 2021)	52
Tab. 4.6	Redukcia tepelných strát vegetačných striech (Δq) v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou (S2) v dvoch zimných obdobiach december – február 2020/2021 a 2021/2022	65
Tab. 4.7	Výsledky hodnotenia potenciálu globálneho otepľovania	67
Tab. 4.8	Kvantifikácia vplyvu strešných skladieb S1, S2 a S3 na teplotné namáhanie hydroizolačnej membrány	75
Tab. 5.1	Výmena materiálov oproti pôvodnému modelu	81
Tab. 5.2	Parametre popisujúce základné vplyvy na životné prostredie	82
Tab. 6.1	Výmena materiálov oproti pôvodnému modelu	100
Tab. 6.2	Parametre popisujúce základné vplyvy na životné prostredie	101
Tab. 6.3	Výsledky LCA hodnotených fáz životného cyklu pre kultúrny dom	102
Tab. 6.4	Výsledky LCA hodnotených fáz životného cyklu pre kultúrny dom	106
Tab. 7.1	Výmena materiálov oproti pôvodnému modelu	117
Tab. 7.2	Parametre popisujúce základné vplyvy na životné prostredie	117
Tab. 8.1	Výmena materiálov oproti pôvodnému modelu	136
Tab. 8.2	Parametre popisujúce základné vplyvy na životné prostredie	136
Tab. 8.3	Výsledky LCA hodnotených fáz životného cyklu pre kultúrny dom	141
Tab. 10.1	Priebeh ročných bilancií pri posudzovaných objektoch	156
Tab. 10.2	Výroba elektrickej energie	159
Tab. 11.1	Zoznam objektov a údaje o spotrebe tepla na vykurovanie (1995–2025)	167
Tab. 11.2	Zoznam objektov a údaje o spotrebe tepla na vykurovanie (1995–2025)	168
Tab. 11.3	Zoznam objektov a údaje o spotrebe tepla na vykurovanie (1995–2025)	169
Tab. 11.4	Zoznam objektov – rozdelenie do kategórií a prehľad úspor (1995–2025)	170
Tab. 11.5	Prehľad ETICS po rokoch ako boli realizované objekty	171
Tab. 11.6	Energetické vyhodnotenie a porovnanie podľa zateplenia a zdroja tepla	172
Tab. 11.7	Energetické vyhodnotenie a porovnanie podľa zateplenia a konštrukčných systémov	172
Tab. 11.8	Faktory primárnej energie a emisií CO ₂ a podiel na ÚK	173
Tab. 11.9	Výsledné zhodnotenie opatrení (energetické a environmentálne)	173

Zoznam obrázkov

Obr. 3.1	Fázy LCA podľa STN EN ISO 14040	19
Obr. 3.2	Hranice systému v analýze životného cyklu	20
Obr. 3.3	Znázornenie krokov v LCA analýze	21
Obr. 3.4	Hranice systému v analýze nákladov životného cyklu	26
Obr. 4.1	Priemyselné zóny mesta Košice a lokalizácia experimentálneho areálu greenIZOLA na ulici Textilná 8	33
Obr. 4.2	Pohľad na strešné konštrukcie areálu s rozdelením na jednotlivé fázy projektu greenIZOLA	34
Obr. 4.3	Experimentálna vegetačná strecha na južnej terase 2. NP	35
Obr. 4.4	Fáza 2 prístrešok pre skladovanie materiálu s vegetačnými strechami a ich skladbami foto: august 2021	35
Obr. 4.5	Carport s extenzívnou vegetačnou strechou foto: november 2022, rok po výsadbe rastlín	36
Obr. 4.6	Západná terasa a prepojenie systému vegetačnej strechy nad nadstavbou s mokrad'ovou strechou	36
Obr. 4.7	Vegetačná strecha na severnej terase 4. NP	37
Obr. 4.8	Návrh vegetačnej steny na fasáde objektu	37
Obr. 4.9	Návrh biosolárnej strechy kombinujúcej vegetáciu a fotovoltické panely	38
Obr. 4.10	Intenzívna vegetačná strecha na severnej terase 2. NP	38
Obr. 4.11	Umiestnenie experimentálnej vegetačnej strechy v rámci areálu greenIZOLA	39
Obr. 4.12	Príprava strešnej konštrukcie pred realizáciou experimentálnej vegetačnej strechy	40
Obr. 4.13	Rozdelenie experimentálnej strechy na segmenty S1, S2 a S3	40
Obr. 4.14	Vývoj vegetačného krytu experimentálnej strechy s biodiverzným potenciálom	41
Obr. 4.15	Transformácia referenčného segmentu na experimentálnu mokrad'ovú strechu foto: september 2022	41
Obr. 4.16	Schéma experimentálneho meracieho systému	42
Obr. 4.17	Umiestnenie teplotných senzorov a snímačov hustoty tepelného toku v experimentálnych segmentoch	43
Obr. 4.18	Priestorový model experimentálnej vegetačnej strechy a poloha meracích bodov	43
Obr. 4.19	Klimatické podmienky monitorované na experimentálnom centre greenIZOLA počas sledovaného obdobia	45
Obr. 4.20	Merané klimatické parametre: teplota vonkajšieho vzduchu, atmosférické zrážky a globálne slnečné žiarenie pre analyzované obdobie 17. júna 2021 – 23. júna 2021	47
Obr. 4.21	Merané klimatické parametre: teplota vonkajšieho vzduchu, atmosférické zrážky a globálne slnečné žiarenie pre analyzované obdobie 9. júla 2021 – 15. júla 2021	49
Obr. 4.22	Merané klimatické parametre: teplota vonkajšieho vzduchu, atmosférické zrážky a globálne slnečné žiarenie pre analyzované obdobie 16. januára 2021 – 21. januára 2021	50
Obr. 4.23	Merané klimatické parametre: teplota vonkajšieho vzduchu, atmosférické zrážky a globálne slnečné žiarenie pre analyzované obdobie 9. februára 2021 – 14. februára 2021	51
Obr. 4.24	Schematické zobrazenie experimentálnych segmentov, prepojenie na meraciu infraštruktúru a pozícia senzora na meranie povrchovej teploty hydroizolačnej vrstvy (P4)	54
Obr. 4.25	Boxplot hodinových povrchových teplôt membrány pre každý analyzovaný mesiac počas zím 2020 – 2022	55
Obr. 4.26	Najvyššie denné rozdiely povrchovej teploty $\theta_{\Delta T24,max}$ počas zím 2020 – 2022	56

Obr. 4.27	<i>Histogram hodinových povrchových teplôt membrány v referenčnej štrkovej skladbe (S2) a v skladbách vegetačných segmentov (S1 a S3)</i>	56
Obr. 4.28	<i>Povrchové teploty membrány v segmentoch S1, S2 a S3 a ich vzájomné časové posuny počas slnečných zimných dní</i>	57
Obr. 4.29	<i>Senzory na meranie hustoty tepelného toku</i>	58
Obr. 4.30	<i>Hodinové hodnoty hustoty tepelného toku namerané cez experimentálne segmenty S1 (zelená), S2 (fialová) a S3 (modrá) pre časovú periódu TP1 (8. – 23. 2. 2021) so snehovou pokrývkou (ľavý panel) a periódu TP2 (5. – 20. 1. 2022) bez snehu (pravý panel)</i>	59
Obr. 4.31	<i>Segment S1: hodinová hustota tepelného toku počas chladného obdobia TP2 bez snehu (5. – 20. 1. 2022), v kontexte vonkajšej teploty vzduchu a povrchovej teploty membrány</i>	60
Obr. 4.32	<i>Hodinová hustota tepelného toku počas chladného obdobia TP2 bez snehu (5. – 20. 1.), v kontexte vonkajšej teploty vzduchu a povrchovej teploty membrány</i>	61
Obr. 4.33	<i>Denné tepelné straty (C) cez segmenty S1, S2 a S3, povrchová teplota strešnej membrány (B) počas obdobia TP2 (5. – 20. január 2022) v kontexte klimatických parametrov (A)</i>	63
Obr. 4.34	<i>Podiel materiálov na GWP-fosíly vo fáze produktu</i>	68
Obr. 4.35	<i>Podiel fáz životného cyklu na GWP-fosíly vo fáze produktu</i>	69
Obr. 4.36	<i>Výsledky hodnotenia GWP-fosíly pre tri varianty strešných konštrukcií</i>	70
Obr. 4.37	<i>Aplikácia skladieb pre strechy budovy Izola Košice, s.r.o.</i>	72
Obr. 5.1	<i>Základná škola - pohľad severozápadný</i>	77
Obr. 5.2	<i>Základná škola – pohľad severovýchodný</i>	78
Obr. 5.3	<i>Základná škola – pohľad severozápadný</i>	79
Obr. 5.4	<i>Základná škola – pohľad severovýchodný</i>	80
Obr. 5.5	<i>Výsledky globálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy</i>	90
Obr. 5.6	<i>Výsledky regionálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy</i>	91
Obr. 5.7	<i>Výsledky lokálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy</i>	92
Obr. 5.8	<i>Výsledky LCC pre analyzované scenáre základnej školy</i>	93
Obr. 5.9	<i>Výsledky celkových nákladov pre analyzované scenáre základnej školy</i>	94
Obr. 6.2	<i>Výsledky LCA pre ukazovatele životného cyklu</i>	103
Obr. 6.3	<i>Analýza materiálov s najväčším environmentálnym vplyvom v percentách</i>	105
Obr. 6.4	<i>Výsledky LCA pre ukazovatele životného cyklu</i>	107
Obr. 6.5	<i>Analýza materiálov s najväčším environmentálnym vplyvom v percentách</i>	108
Obr. 6.6	<i>Výsledky LCC pre analyzované scenáre kultúrneho domu</i>	110
Obr. 6.7	<i>Výsledky celkových nákladov pre analyzované scenáre kultúrneho domu</i>	111
Obr. 7.1	<i>Výsledky globálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy</i>	122
Obr. 7.2	<i>Výsledky regionálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy</i>	123
Obr. 7.3	<i>Výsledky lokálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy</i>	124
Obr. 7.4	<i>Výsledky LCC pre analyzované scenáre základnej školy</i>	126
Obr. 7.5	<i>Výsledky celkových nákladov pre analyzované scenáre základnej školy</i>	127
Obr. 8.1	<i>Pôvodná budova kultúrneho domu pred rekonštrukciou – bočný pohľad</i>	130

Obr. 8.2	<i>Pôvodná budova kultúrneho domu pred rekonštrukciou – predný pohľad</i>	130
Obr. 8.3	<i>Pôvodná budova kultúrneho domu – vizualizácie rekonštrukcie - axonometria</i>	131
Obr. 8.4	<i>Pôvodná budova kultúrneho domu – vizualizácie rekonštrukcie – bočný pohľad</i>	131
Obr. 8.5	<i>Pôvodná budova kultúrneho domu – vizualizácie rekonštrukcie – predný pohľad</i>	132
Obr. 8.6	<i>Pôvodná budova kultúrneho domu – vizualizácie rekonštrukcie - axonometria</i>	132
Obr. 8.7	<i>Výsledky LCA pre ukazovatele životného cyklu</i>	139
Obr. 8.8	<i>Analýza materiálov s najväčším environmentálnym vplyvom v percentách</i>	140
Obr. 8.9	<i>Výsledky LCA pre ukazovatele životného cyklu</i>	142
Obr. 8.10	<i>Analýza materiálov s najväčším environmentálnym vplyvom v percentách</i>	143
Obr. 8.11	<i>Výsledky LCC pre analyzované scenáre kultúrneho domu</i>	145
Obr. 8.12	<i>Porovnanie výsledkov LCC pre analyzované scenáre kultúrneho domu</i>	146
Obr. 9.1	<i>Pohľad na skúmanú administratívnu budovu HONORS a ukážka na mape</i>	151
Obr. 9.2	<i>Priebeh spotreby tepla</i>	153
Obr. 9.3	<i>Priebeh spotreby primárnej energie</i>	153
Obr. 9.4	<i>Priebeh produkcie emisií CO₂</i>	154
Obr. 10.1	<i>Energetická schéma zásobovania objektu elektrinou</i>	155
Obr. 10.2	<i>Objekt PRIBETA</i>	157
Obr. 10.3	<i>Objekt CHOTÍN</i>	158
Obr. 11.1	<i>Bytový dom Čínska 25, 27, 29, 31 Košice</i>	160
Obr. 11.2	<i>Možnosti na úprave rozvodov vykurovania a realizované riešenie</i>	161
Obr. 11.3	<i>Rekonštrukcia ekvitermického uzla vykurovania na vstupe do objektu</i>	161
Obr. 11.4	<i>Rekonštrukcia systému dodávky teplej vody z OST a vyregulovanie cirkulačných rozvodov teplej vody</i>	162
Obr. 11.5	<i>Inštalácia doplnkového zdroja ohrevu teplej vody pre objekt = fotovoltické panely v ostrovej prevádzke na ohrev TV v zásobníkoch</i>	162
Obr. 11.6	<i>Popis a obrázok z montáže fotovoltických panelov na streche objektu</i>	163
Obr. 11.7	<i>Elektrická schéma a schéma riadenia ohrevu a dodávky teplej vody</i>	163
Obr. 11.8	<i>Energetické certifikáty objektu pred úpravou Variant „0“, Po zateplení a úprave na vykurovaní Variant „1“, Po inštalácii fotovoltických panelov na ohrev teplej vody Variant „2“</i>	164
Obr. 11.9	<i>Skladba systému ETICS</i>	172
Obr. 11.10	<i>OST 1009 - (Floriánska 4, 6)</i>	173
Obr. 11.11	<i>OST 1101 - (Watsonova 53; Watsonova 57)</i>	173
Obr. 11.12	<i>OST 1104 - (Tatranská 1,3)</i>	174
Obr. 11.13	<i>OST 1105 - (Branisková 1,3; 5,7; 9,11; Branisková 2-24; Tatranská 2,4; Tatranská 6,8)</i>	174
Obr. 11.14	<i>OST 1209 - (Kuzmányho 35-41; Škultétyho 2; Vojenská 1-3; 4-6; 7-9; 10-12)</i>	175
Obr. 11.15	<i>OST 1221 - (Dargovská 1; Kuzmányho 31,33; Magurská 1,3)</i>	175
Obr. 11.16	<i>OST 1009 - (Karpatská 1; Karpatská 2; Karpatská 3; Dargovská 2)</i>	176
Obr. 11.17	<i>OST 1223 - (L.Novomeského 1; 3; 5; Magurská 5,7,9; Magurská 11,13,15)</i>	176
Obr. 11.18	<i>OST 1225 - (Československej armády 6, 8, 10)</i>	176
Obr. 11.19	<i>OST 1226 - (Kpt.Nálepku 1-5; 7-11; 13-17; Kuzmányho 21-27; Magurská 2)</i>	177
Obr. 11.20	<i>OST 1701 - (Hutnícka 2-6; Hutnícka 8-18)</i>	177
Obr. 11.21	<i>OST 2224 - (Pekinská 10,12; Pekinská 14; Pekinská 16,18)</i>	178

Obr. 11.22	OST 2225 - (Bukureštská 29, 30-31, 32; Havanská 7-9, 10-12, 13, 14-15)	178
Obr. 11.23	OST 2231 - (Aténska 5 - 11; Bruselská 8 -10)	179
Obr. 11.24	OST 2232 - (Aténska 12 - 19; Aténska 20 - 25)	179
Obr. 11.25	OST 2233 - (Helsinská 2-8; 10-14; 16-24; Helsinská 1-7; 9-13; 15-21)	180
Obr. 11.26	OST 2234 - (Madridská 1; 2; 3; Viedenská 2 – 38; Viedenská 1 - 31)	180
Obr. 11.27	Plynová kotolňa P1+P2 - (Gerlachovská 3, 5, 7)	180
Obr. 11.28	Plynová kotolňa P4 - (Cesta pod hradovou 30)	181

1 Dekarbonizácia v procese obnovy budov – súčasný stav poznania

Sektor budov zohráva v globálnom boji proti klimatickým zmenám kritickú úlohu. V rámci Európskej únie sú budovy zodpovedné približne za 40 % celkovej spotreby energie a produkujú 36 % emisií skleníkových plynov spojených s energiou. Väčšina existujúceho fondu budov bola postavená v čase, keď energetická efektívnosť nebola prioritou, čo znamená, že milióny stavieb dnes nespĺňajú moderné štandardy udržateľnosti.

Dekarbonizácia obnovy budov preto presahuje rámec bežnej rekonštrukcie. Nejde len o kozmetické úpravy alebo jednoduchú výmenu kotla. Ide o proces transformácie existujúceho fondu budov na vysoko energeticky hospodárne a nízkoemisné objekty. Tento proces je nevyhnutný na dosiahnutie cieľa klimatickej neutrality do roku 2050. Cieľom dekarbonizovanej obnovy je radikálne znížiť prevádzkové emisie (spôsobené vykurovaním, chladením a osvetlením) a zároveň minimalizovať emisie viazané na materiály použité pri samotnej obnove. Úspešná dekarbonizácia prináša nielen environmentálne benefity, ale aj zvýšený komfort bývania, nižšie účty za energie a vyššiu trhovú hodnotu nehnuteľností.

Aby bola obnova v súlade s cieľmi dekarbonizácie, musí byť komplexná a systematická. Tento prístup stojí na troch vzájomne prepojených pilieroch, ktoré nemožno vnímať izolovane. Jedná sa o znižovanie energetickej náročnosti, elektrifikáciu a prechod na obnoviteľné zdroje energie a zohľadnenie zabudovaného uhlíka.

1.1 Znižovanie energetickej náročnosti

Základom každej úspešnej dekarbonizácie je významné zníženie potreby energie na prevádzku budovy. Tento prístup, známy v európskej legislatíve ako princíp „prvoradosti energetickej efektívnosti“ (Energy Efficiency First), vychádza z logického predpokladu: najlacnejšia a najekologickejšia energia je tá, ktorú vôbec netreba vyrobiť, distribuovať a spotrebovať.

Pred akoukoľvek inštaláciou obnoviteľných zdrojov alebo výmenou zdroja tepla je nevyhnutné najprv optimalizovať pasívne prvky budovy. Ak by sme tento krok preskočili, nové technológie (napr. tepelné čerpadlá) by museli byť zbytočne predimenzované, čo by neúmerne zvýšilo investičné náklady a znížilo celkovú efektívnosť systému.

Proces minimalizácie energetickej náročnosti stojí na štyroch kľúčových opatreniach:

a) Tepelná izolácia obálky budovy

Kvalitné zateplenie je technicky najúčinnnejším spôsobom, ako zabrániť tepelným stratám v zime a tepelným ziskom v lete. Aplikácia tepelnoizolačného systému musí byť spojitá a musí zahŕňať všetky ochladzované konštrukcie – fasádu, strešný plášť a stropy nad nevykurovanými priestormi (suterén) alebo podlahu na teréne. Výber materiálu (expandovaný polystyrén - EPS, minerálna vlna, fenolické peny) a jeho hrúbky nesmie byť náhodný. Musí vychádzať z tepelno-technického posudku, ktorý zohľadňuje nielen súčiniteľ prechodu tepla (U), ale aj difúziu vodných pár, aby sa predišlo kondenzácii vlhkosti vo vnútri konštrukcie (rosný bod). Pri návrhoch sa čoraz viac kladie dôraz na fázový posun teplotného kmitu (schopnosť izolácie

zadržať teplo a vpustiť ho do interiéru s oneskorením), čo je kľúčové pre prevenciu prehrievania podkrovných priestorov v lete.

b) Eliminácia tepelných mostov

Tepelné mosty sú miesta v konštrukcii, kde dochádza k zvýšenému úniku tepla v porovnaní s okolím. Ich zanedbanie pri obnove môže znehodnotiť celú investíciu. Najčastejšími miestami únikov sú styk steny a strechy (atika), rohy budov, okenné ostenia, preklady a napojenia balkónových dosiek. Pri balkónoch je ideálnym riešením ich úplné oddelenie od statickej konštrukcie alebo použitie prvkov na prerušenie tepelného mosta (tzv. isokorb prvky). Okrem energetických strát sú tepelné mosty nebezpečné najmä z hygienického hľadiska. Na chladných vnútorných povrchoch v týchto miestach dochádza ku kondenzácii vzdušnej vlhkosti, čo vytvára ideálne prostredie pre rast plesní. Odstránenie tepelných mostov je tak priamou prevenciou respiračných ochorení obyvateľov.

c) Výmena otvorových výplní (Okná a dvere)

Pôvodné okná a dvere sú v starších budovách často najslabším článkom obálky, cez ktorý môže unikať až 30 % tepla. Súčasná obnova vyžaduje inštaláciu okien s izolačným trojsklom, kde súčiniteľ prechodu tepla celého okna dosahuje hodnoty pod $0,85 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Dôležitý je aj tzv. solárny faktor (g), ktorý určuje, koľko slnečnej energie prenikne dnu – v zime sú tieto zisky žiadané, v lete však musia byť regulované tieniacou technikou. Ani najkvalitnejšie okno nebude fungovať, ak je zle osadené. Moderná montáž vyžaduje použitie parotesných a paropriepustných pások (systém RAL montáže), ktoré zabezpečia, že pripojovacia škára medzi oknom a stenou nebude v budúcnosti degradovať a plesnivieť.

d) Vzduchotesnosť a riadené vetranie

Historicky budovy „dýchali“ cez netesnosti v oknách a škáry v murive. Hĺbková obnova však budovu hermeticky uzavrie, čo mení fyziku jej fungovania. Cieľom je eliminovať nekontrolovanú infiltráciu studeného vzduchu (prievan), ktorá spôsobuje energetické straty. Kvalita utesnenia sa po obnove overuje tzv. Blower-door testom. Utesnená budova bez vetrania vedie k hromadeniu CO_2 , vlhkosti a škodlivín. Preto je pri dekarbonizácii takmer nevyhnutné inštalovať systémy riadeného vetrania s rekuperáciou tepla. Tieto zariadenia zabezpečujú neustály prísun čerstvého filtrovaného vzduchu, pričom využívajú teplo z odvádzaného vzduchu na ohrev toho prichádzajúceho. Výsledkom je zdravé vnútorné prostredie bez potreby otvárať okná a strácať teplo.

1.2 Elektrifikácia a prechod na obnoviteľné zdroje energie (OZE)

Po znížení energetickej potreby v budovách a ich kvalitnom zateplení je ďalším krokom k udržateľnosti dekarbonizácia zdroja energie. Tento proces sa zameriava na postupný prechod od tradičných fosílnych palív, ako sú uhlie, ropa a zemný plyn, na čistejšie a efektívnejšie alternatívy. Cieľom je znížiť GHG emisie a zabezpečiť energetickú nezávislosť prostredníctvom využívania obnoviteľných zdrojov energie (OZE). Prechod na OZE v budovách prispieva k efektívnejšiemu využívaniu energií a znižovaniu nákladov na prevádzku.

Tepelné čerpadlá predstavujú jednu z najefektívnejších a ekologických alternatív na vykurovanie budov. Využívajú vonkajšiu energiu (vzduch, zem alebo vodu) na výrobu tepla pre vykurovanie a ohrev vody. Na rozdiel od tradičných plynových kotlov dokážu tepelné čerpadlá zo 1 kWh elektriny vyrobiť až 5 kWh tepla, čo znamená podstatné úspory na nákladoch na energiu. Výhodami sú

- Vysoká účinnosť: Môže dosiahnuť účinnosť až 400–500 % (COP – koeficient výkonu).
- Ekologický prínos: Znižujú emisie CO₂ tým, že nahrádzajú fosílna palivá.
- Nízke prevádzkové náklady: Po počiatočnej investícii majú tepelné čerpadlá nízke prevádzkové náklady.
- Inštalácia do nízkotepelných vykurovacích systémov: Ideálne pre podlahové kúrenie a iné systémy s nízkou teplotou vykurovania.

Tepelné čerpadlá sú najvhodnejšie pre budovy s kvalitným zateplením, kde je potrebné vykurovať s nízkymi teplotami. Môžu byť použité v rôznych aplikáciách – od rodinných domov až po komerčné budovy.

Inštalácia **fotovoltických panelov** umožňuje premeniť budovu na aktívneho výrobcu energie. Solárne panely generujú elektrinu, ktorá môže byť využitá na napájanie tepelného čerpadla, domácich spotrebičov, alebo dokonca na nabíjanie elektromobilov. Tento systém znižuje závislosť od verejnej elektrickej siete a zároveň prispieva k znižovaniu uhlíkovej stopy. Výhodami sú:

- Nezávislosť na sieti: Znižujú náklady na elektrickú energiu a poskytujú nezávislosť na tradičných energetických dodávateľoch.
- Úspora nákladov: Prebytky energie môžu byť uložené v batériových úložiskách alebo zdieľané v rámci energetických komunít.
- Dlhodobé zníženie nákladov: Po inštalácii fotovoltických panelov sú náklady na prevádzku minimálne.

Fotovoltické systémy sú ideálne pre budovy s dostatočným slnečným žiarením. V kombinácii s batériovými úložiskami môže byť energia uložená na neskoršie použitie, čo zvyšuje sebestačnosť budovy.

Solárne termické kolektory stále zostávajú efektívnym riešením pre ohrev vody, najmä v bytových domoch s vysokou spotrebou teplej úžitkovej vody (TÚV). Tieto systémy fungujú na princípe zachytávania slnečného žiarenia, ktoré sa následne využíva na ohrev vody. Výhody solárnych termických systémov:

- Zníženie nákladov na teplú vodu: Vhodné pre domácnosti alebo objekty s vysokou spotrebou teplej vody (hotely, apartmány, školy).
- Lokalizované využitie energie: Využíva slnečnú energiu priamo na ohrev vody bez potreby ďalších energetických zdrojov.

- Nízke prevádzkové náklady: Po inštalácii je údržba minimálna.

Aj keď fotovoltika je technologicky pokročilejšia, solárne termické systémy sú stále veľmi populárne pre špecifické aplikácie, ako je príprava teplej vody.

Elektrifikácia vykurovania a elektrické kotly: Elektrické kotly sú ďalším krokom v dekarbonizácii vykurovania. Namiesto tradičného využívania fosílnych palív sa elektrické kotly napájajú z obnoviteľných zdrojov energie a využívajú elektrinu na výrobu tepla. Výhodami sú:

- Jednoduchá inštalácia a údržba: Elektrické kotly sú často jednoduchšie na inštaláciu a vyžadujú minimálnu údržbu.
- Možnosť kombinácie s OZE: Ideálne v kombinácii so systémami, ako sú fotovoltika alebo veterné turbíny.

Elektrifikácia vykurovania, spolu s využitím OZE, je jedným z kľúčových krokov smerujúcich k uhlíkovej neutralite v budovách.

Technológie, ako sú tepelné čerpadlá, fotovoltika, solárne termické systémy a elektrifikácia vykurovania, sú kľúčovými krokmi k zabezpečeniu udržateľnej a energeticky efektívnej budúcnosti. Týmto spôsobom sú tieto technológie nielen udržateľné, ale aj ekonomicky výhodné, čo je dôležité v súčasnom prechode na obnoviteľné zdroje energie. Po znížení energetickej potreby prichádza na rad dekarbonizácia zdroja energie. Cieľom je úplný odklon od spaľovania fosílnych palív (uhlie, olej, zemný plyn) priamo v budovách.

1.3 Zabudovaný uhlík

Zabudovaný uhlík sa stal kľúčovým aspektom pri hodnotení udržateľnosti budov. Tento pojem zahŕňa všetky emisie CO₂, ktoré vznikajú počas celého životného cyklu stavebných materiálov, od ich ťažby cez výrobu a dopravu až po likvidáciu na konci životnosti budovy. Na rozdiel od tradičného prístupu, ktorý sa sústredil iba na prevádzkové emisie (emisie vznikajúce počas prevádzky budovy, ako je vykurovanie alebo chladenie), skutočná dekarbonizácia musí zohľadniť aj túto „skrytú“ uhlíkovú stopu spojenú so stavebnými materiálmi.

Tento prístup si vyžaduje komplexné hodnotenie životného cyklu budovy (LCA - Life Cycle Assessment), kde sa berú do úvahy nielen energetické nároky na prevádzku budovy, ale aj všetky fázy od ťažby surovín až po likvidáciu materiálov. Efektívna dekarbonizácia budov tak nespočíva len v prechode na obnoviteľné zdroje energie, ale aj v redukcii zabudovaného uhlíka, ktorý je často významným príspevkom k celkovej uhlíkovej stope budovy.

a) Výber nízkoemisných materiálov

Pri obnove alebo výstavbe nových budov je veľmi dôležité zohľadniť materiály, ktoré majú nízke emisie CO₂. Tieto materiály sa označujú ako nízkoemisné alebo uhlíkovo neutrálne. Ide o materiály, ktoré majú nízku energetickú náročnosť pri výrobe alebo dokonca viažu uhlík počas svojho životného cyklu. Príklady materiálov, ktoré sú vhodné na zníženie zabudovaného uhlíka:

- **Drevo** je prírodný materiál, ktorý pri raste viaže CO₂. Pri správnom spracovaní a použití v stavbách môže byť drevo veľmi udržateľným materiálom, ktorý nielen znižuje emisie počas jeho výroby, ale aj znižuje uhlíkovú stopu stavby celkovo.
- **Celulózová izolácia** je vyrobená z recyklovaného papiera a má nízku energetickú náročnosť pri výrobe. Okrem toho môže viazať uhlík, čo znamená, že počas jej životného cyklu môže prispieť k zníženiu celkovej uhlíkovej stopy.
- **Konopná izolácia** je vyrobená z konope, ktoré je rýchlo rastúca rastlina a dokáže viazať uhlík počas svojej rastovej fázy. Konopné výrobky sú ekologické, majú výborné tepelnoizolačné vlastnosti a nízke emisie pri výrobe.

Výber takýchto materiálov má kľúčový vplyv na znižovanie zabudovaného uhlíka v budovách a prispieva k udržateľnej výstavbe, ktorá sa snaží minimalizovať negatívny vplyv na životné prostredie.

b) Cirkulárna ekonomika a opätovné využitie materiálov

Jedným z najefektívnejších spôsobov, ako znížiť zabudovaný uhlík v budovách, je aplikácia princípov cirkulárnej ekonomiky. Namiesto tradičného prístupu, ktorý sa zameriava na búranie starých budov a stavanie nových, je ekologickéjšie zamerať sa na obnovu existujúcich štruktúr. Obnova namiesto demolácie má množstvo výhod:

- **Recyklovateľnosť materiálov:** Materiály, ktoré sú použité v existujúcich budovách, môžu byť recyklované a opätovne použité v novej výstavbe. Recyklované materiály, ako napríklad recyklované sklo, oceľ alebo betón, majú oveľa nižšiu uhlíkovú stopu, než keď sú použité materiály vyrábané od začiatku.
- **Izolácie z recyklovaného skla alebo textilu:** Rôzne typy recyklovaných materiálov môžu byť použité na výrobu energeticky efektívnych a ekologických izolačných materiálov, čím sa znižuje potreba ťažby nových surovín a znižuje sa uhlíková stopa.
- **Opätovné využitie stavebných prvkov:** Rámové konštrukcie, dvere, okná alebo iné stavebné prvky môžu byť opätovne použité, čo znižuje potrebu nových materiálov a znižuje emisie spojené s výrobou.

Opätovné využitie materiálov je nielen ekologicky výhodné, ale aj ekonomicky efektívne. Tým sa predchádza odpadu a znižuje sa potreba nových surovín.

c) Lokalita a lokálne materiály

Výber materiálov s ohľadom na ich pôvod je ďalším dôležitým aspektom v boji proti zabudovanému uhlíku. Používanie materiálov od lokálnych výrobcov znižuje emisie spojené s ich dopravou na stavbu, čím sa minimalizujú náklady na palivo a emisie spojené s kamiónovou dopravou na veľké vzdialenosti. Výhody používania lokálnych materiálov:

- **Nižšie emisie CO₂:** Kratšia vzdialenosť medzi výrobcami a stavbou znamená menej paliva a nižšie emisie CO₂ spojené s dopravou.

- **Podpora miestnej ekonomiky:** Nákup lokálnych materiálov podporuje miestne hospodárstvo a znižuje závislosť od globálnych dodávateľských reťazcov.
- **Rýchlejšia dostupnosť a nižšie náklady na dopravu:** Materiály dostupné v blízkosti stavby môžu byť doručené rýchlejšie, čo šetrí čas a znižuje náklady na dopravu.

Použitie lokálnych materiálov môže významne prispieť k udržateľnosti stavby, znižujúc dopad na životné prostredie a zvyšujúc energetickú efektívnosť projektu.

2 Inteligentné budovy a digitalizácia

Dekarbonizácia v 21. storočí nie je možná bez efektívneho využívania dát. Budovy, ktoré prechádzajú obnovou, sa musia stať "inteligentnými", aby dokázali efektívne komunikovať s energetickou sieťou a reagovať na aktuálne potreby užívateľov. Digitalizácia a zavedenie inteligentných technológií umožňuje optimalizovať spotrebu energie, znížiť náklady a zvýšiť pohodlie obyvateľov. Pre tento proces je potrebná implementácia sofistikovaných systémov, ktoré sledujú a riadia prevádzku budovy v reálnom čase.

a) Systémy merania a regulácie (MaR)

Systémy merania a regulácie (MaR) sú kľúčové pri implementácii energeticky efektívnych technológií v budovách. Tieto systémy umožňujú sledovať spotrebu energie a optimálne riadiť vykurovanie, osvetlenie a ďalšie parametre budovy na základe aktuálnych podmienok a potrieb užívateľov.

- **Zónová regulácia vykurovania:** Hĺbková obnova budov zahŕňa inštaláciu zónovej regulácie vykurovania, čo znamená, že každá miestnosť môže byť riadená individuálne. Tento prístup umožňuje efektívnejšie vykurovanie, pretože teplota môže byť nastavená podľa preferencií v každej miestnosti. Tým sa znižujú energetické straty a spotreba energie sa znižuje na minimum.
- **Inteligentné termostaty:** Inteligentné termostaty, ktoré sa učia návyky obyvateľov, umožňujú automatické prispôbenie teploty na základe správania a preferencií užívateľov. Tieto termostaty môžu sledovať, kedy sú obyvatelia doma, a optimalizovať vykurovanie a chladenie podľa ich potrieb. Týmto spôsobom sa minimalizujú energetické náklady, pretože teplota je udržiavaná len vtedy, keď je to potrebné.

b) Smart Readiness Indicator (SRI)

Smart Readiness Indicator (SRI) je nový nástroj, ktorý zavádza Európska únia na hodnotenie schopnosti budovy implementovať inteligentné riešenia. Tento indikátor hodnotí, do akej miery je budova pripravená prispôbiť svoju prevádzku potrebám užívateľov a energetickej siete. Príklady použitia SRI:

- **Optimalizácia spotreby energie:** Budova s vysokým hodnotením SRI môže presunúť spotrebu energie na čas, keď je v sieti nadbytok obnoviteľných zdrojov, napríklad pri prebytku energie zo slnečných panelov.
- **Inteligentné riadenie vykurovania a chladenia:** Budova môže automaticky upravovať teplotu podľa aktuálnych podmienok a predpovedí počasia, čo pomáha optimalizovať spotrebu energie.
- **Zlepšenie komfortu a pohody:** SRI hodnotí aj schopnosť budovy prispôbiť sa komfortu užívateľov, napríklad prostredníctvom optimalizácie osvetlenia alebo nastavenia teploty na základe individuálnych preferencií.

SRI poskytuje konkrétny a merateľný ukazovateľ, ktorý pomáha zhodnotiť, do akej miery je budova pripravená na prechod na inteligentné a energeticky efektívne riešenia.

c) Digitálne dvojča budovy (Digital Twin)

Digitálne dvojča budovy je virtuálny model fyzickej budovy, ktorý sa používa na simuláciu a optimalizáciu rôznych aspektov jej prevádzky. Tento model umožňuje architektom, inžinierom a správcovským firmám simulovať rôzne scenáre obnovy ešte pred samotnou realizáciou projektov, čím získať cenné údaje o potenciálnych úsporách a optimalizácii spotreby energie. Výhody digitálneho dvojčaťa:

- Simulácie a optimalizácia pred realizáciou: Digitálny model umožňuje testovať rôzne scenáre obnovy (napr. inštalácia nových vykurovacích systémov, zateplenie budovy) a optimalizovať tieto procesy ešte pred začatím fyzickej práce.
- Real-time monitoring: Po dokončení renovácie môže digitálne dvojča slúžiť ako nástroj na neustále monitorovanie a analýzu výkonu budovy v reálnom čase. Tento nástroj môže poskytovať dáta o spotrebe energie, efektívnosti vykurovania a chladenia, ako aj o celkovom environmentálnom dopade.
- Predikcia a údržba: Digitálne dvojča môže predvídať poruchy a poskytovať odporúčania na preventívnu údržbu, čo znižuje náklady na opravy a predlžuje životnosť budovy.

Digitálne dvojča teda predstavuje prelomovú technológiu v oblasti správy a obnovy budov. Umožňuje integrovať rôzne digitálne nástroje, čo zvyšuje efektívnosť prevádzky budovy a podporuje rozhodovanie na základe analýzy veľkého množstva dát.

3 Životný cyklus budov

3.1 Hodnotenie environmentálnych indikátorov

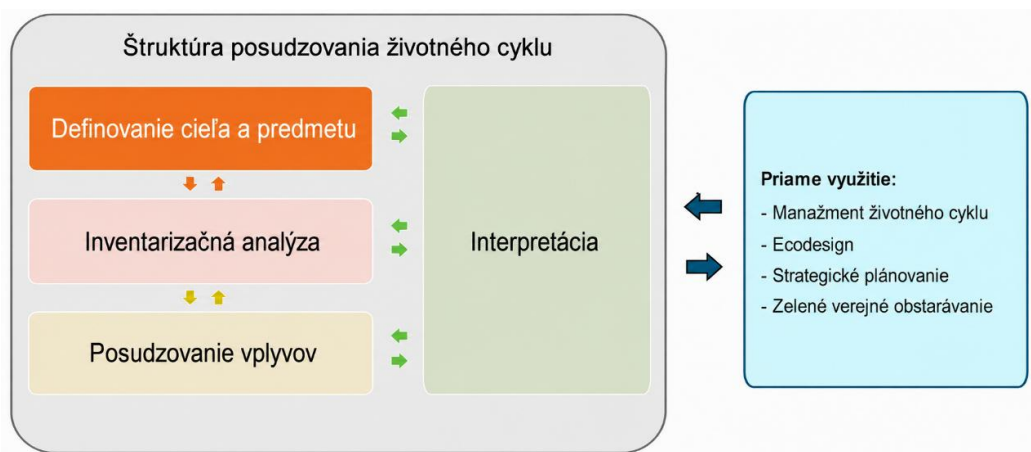
Environmentálne hodnotenie životného cyklu (Life Cycle Assessment LCA) je jednou z metód na podporu environmentálnych informačných potrieb prostredníctvom hodnotenia produktov s viacerými znakmi. Hodnotenie životného cyklu je nástroj na systematickú analýzu environmentálnych vlastností produktov alebo procesov počas celého životného cyklu, vrátane ťažby surovín, výroby, používania a zhodnocovania a zneškodňovania odpadov na konci životnosti. LCA identifikuje a kvantifikuje materiálové a energetické toky (spotrebovanú energiu a materiály) a emisie uvoľnené do životného prostredia a hodnotí vplyv týchto vstupov a výstupov. Základné princípy, požiadavky a štruktúra LCA je popísaná v normách ISO 14040: 2006 [1] a ISO 14044: 2006 [2].

Podľa ISO 14040 je LCA nástroj na hodnotenie environmentálnych aspektov a potenciálnych vplyvov spojených s produktom, podľa:

- zostavenia zoznamu relevantných vstupov a výstupov produktového systému;
- hodnotenia potenciálnych environmentálnych vplyvov spojených s týmito vstupmi a výstupmi;
- interpretácie výsledkov fázy inventarizácie a fázy hodnotenia vplyvu vo vzťahu k cieľom štúdie.

Štruktúra LCA

Hlavná štruktúra pozostáva zo 4 fáz, ktoré sú vzájomne závislé a výsledky z jednej fázy ovplyvňujú ostatné fázy (obr. 3.1).



Obr. 3.1 Fázy LCA podľa STN EN ISO 14040

3.1.1 Definovanie cieľa a predmetu

Prvým krokom v LCA analýze je definovanie cieľa a jednoznačné zodpovedanie týchto otázok:

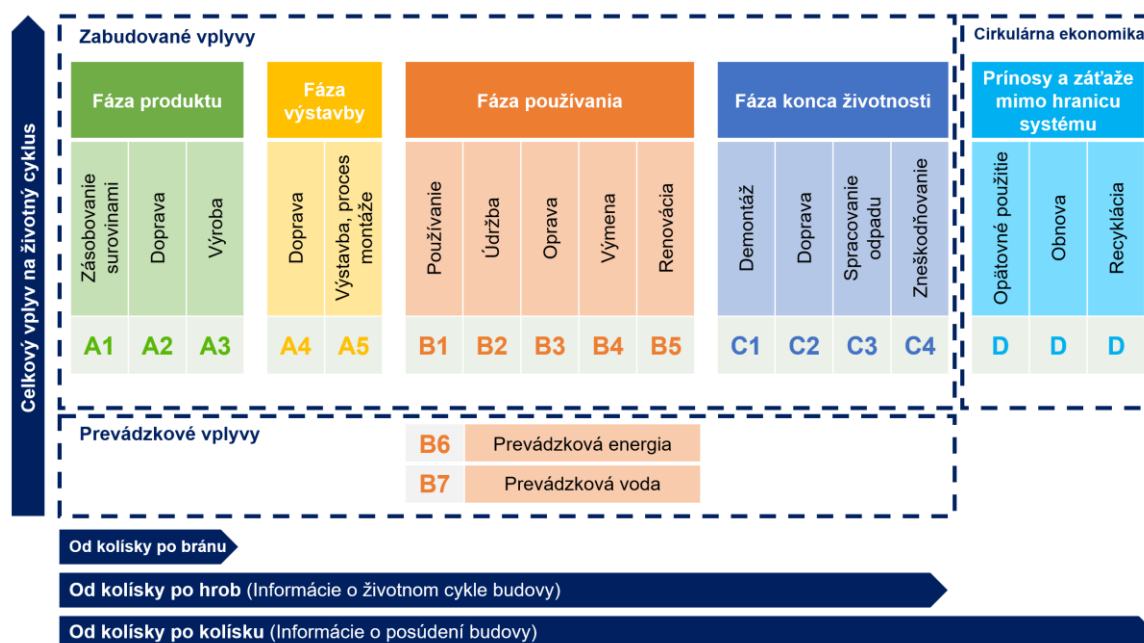
- Aké je predpokladané použitie?
- Aké sú dôvody na vypracovanie LCA štúdie?
- Komu je LCA štúdia cielená a komu majú byť výsledky určené?
- Majú byť výsledky použité na porovnávacie tvrdenia určené na zverejnenie?

Presné zadefinovanie cieľa slúži na elimináciu nedorozumení v interpretácii výsledkov. Po zadefinovaní cieľa sa definuje rozsah analýzy. Podľa normy by mali byť zadefinované a jasne určené tieto parametre: funkcia produktového systému, funkčná jednotka, hranica systému, postupy priradovania, typy hodnotených dopadov, metodika hodnotenia vplyvov a interpretácia výsledkov, požiadavky na údaje, predpoklady, obmedzenia, požiadavky na kvalitu údajov, typ kritického posúdenia, ak existuje a typ a formát správy požadovanej pre LCA štúdiu.

Pri **obnove budov** je potrebné jasne definovať rozsah obnovy, referenčný stav budovy pred obnovou, navrhované opatrenia (zateplenie, výmena otvorových konštrukcií, modernizácia technických systémov budovy, využitie obnoviteľných zdrojov energie) a hodnotené obdobie životnosti obnovených konštrukcií a technických zariadení.

V prípade **obnovy budov** sa funkčná jednotka najčastejšie stanovuje ako 1 m² podlahovej plochy budovy počas referenčného obdobia životnosti (napr. 50 rokov) alebo ako poskytovanie požadovanej úrovne energetických a prevádzkových služieb budovy počas definovaného časového obdobia. Takto definovaná funkčná jednotka umožňuje objektívne porovnávanie rôznych variantov obnovy z hľadiska environmentálnych aj ekonomických dopadov.

Systémové hranice životného cyklu podľa normalizovaných modulov A1 až D sú uvedené na obr. 3.2 [3].



Obr. 3.2 Hranice systému v analýze životného cyklu

3.1.2 Inventarizačná analýza

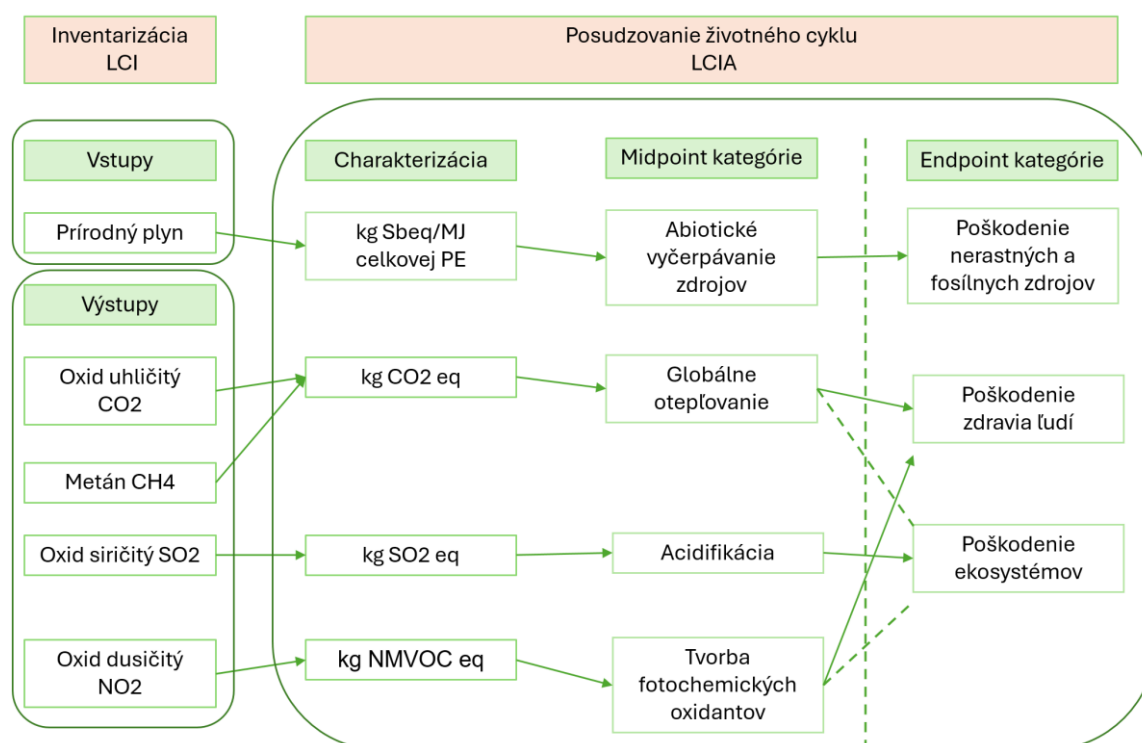
Inventarizačná analýza (Life Cycle Inventory Analysis, LCI) je časovo najnáročnejšou časťou LCA štúdie. Riadi sa vopred definovaným cieľom a rozsahom LCA analýzy a jej základnou činnosťou je zhromažďovanie a zostavenie údajov o elementárnych tokoch zo všetkých procesov v analyzovanom produktovom systéme. Súpis elementárnych tokov sa používa ako základ pre následnú fázu posúdenia vplyvu na životné prostredie. Výsledkom inventarizačnej analýzy je zoznam kvantifikovaných elementárnych tokov pre hodnotené fázy životného cyklu a používa sa ako vstup pre ďalšiu fázu, a to analýzu dopadov na životné prostredie LCIA.

Výstupom inventarizačnej analýzy je teda súbor údajov, ktoré zahŕňajú materiálové toky vstupujúce a vystupujúce cez hranicu systému. Jedná sa o informácie, ako sú: množstvo látok, ktoré sa dostávajú počas životného cyklu produktu do životného prostredia vo forme emisií a množstvo prírodných surovín, ktoré sa spotrebovalo. Tento súbor údajov sa nazýva ekovektor produktu. Získané informácie sa môžu použiť aj na úpravu požiadaviek definície rozsahu, napríklad ak sa vyskytnú nepredvídané obmedzenia údajov, ktoré môžu viesť k úprave požiadaviek na úplnosť analýzy. Toto všetko je potrebné dostatočne zdokumentovať pre prípadné porovnávanie produktov [4].

Pri hodnotení **obnovy budov** inventarizačná analýza zahŕňa údaje o množstvách zabudovaných materiálov, dopravných vzdialenostiach, stavebných procesoch, spotrebe energií počas prevádzky budovy pred a po obnove, produkcii stavebných odpadov a možnostiach ich opätovného využitia alebo recyklácie. Mimoriadne dôležité sú údaje o energetickej hospodárnosti budovy, keďže prevádzková energia predstavuje významnú časť celkových environmentálnych dopadov počas životného cyklu.

3.1.3 Posudzovanie vplyvov životného cyklu LCIA

Fáza posudzovania vplyvov životného cyklu (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) je zameraná na hodnotenie významnosti potenciálnych environmentálnych vplyvov pomocou výsledkov LCI. Tento proces zahŕňa spájanie inventarizačných údajov so špecifickými environmentálnymi oblasťami vplyvov a indikátormi oblastí vplyvov. Teda prvým krokom pri posudzovaní vplyvov životného cyklu je klasifikácia, priradenie výsledkov z inventarizácie jednotlivým kategóriám dopadu.



Obr. 3.3 Znáozornenie krokov v LCA analýze

Nasleduje charakterizácia, ktorá slúži k vyčísleniu miery pôsobenia elementárnych tokov na jednotlivé oblasti vplyvu. Výstupom je súbor výsledkov indikátorov kategórii dopadu s konkrétnymi hodnotami a definovanými jednotkami, čo sa označuje ako charakterizačný profil.

Prevedenie výstupov inventarizácie na indikátory oblastí vplyvov je možné použitím charakterizačných modelov. Toto prevedenie emisných tokov vyjadrených hmotnostne na konkrétne problémy v životnom prostredí je jedným z hlavných prínosov LCA. Po charakterizácii sa uskutočňuje normalizácia ako vyjadrenie relatívnej miery kategórie dopadu a voliteľným prvkom hodnotenia dopadov je vyjadrovanie spoločenskej významnosti problémov vážením. V praxi je LCIA fáza značne automatizovaná a v podstate vyžaduje od LCA konzultanta výber metódy a ďalšie nastavenia v menu LCA softvéru. Obrázok 3.3 znázorňuje jednotlivé kroky v LCI a LCIA.

Pri posudzovaní metódou LCA sa používajú viaceré metodiky posudzovania environmentálnych dopadov výstupov dát z inventarizácie, takzvaných metodík LCIA. Každá metodika LCIA predstavuje súbor charakterizačných modelov, ktoré prevádzajú hodnoty veľkostí elementárnych tokov na indikátory kategórie vplyvov. V závislosti od koncepcie metodiky LCIA sa jedná o kategórie dopadov midpointové alebo endpointové, t.j. stredové a koncové indikátory.

Ak pre hodnotenie škodlivosti daného elementárneho toku sa neuvažuje nad jeho osudom v životnom prostredí, ale hodnotí sa jeho potenciálna škodlivosť na základe jeho vlastností v porovnaní so zvolenou referenčnou látkou, to znamená, že sa hodnotí miera zasiahnutia danej kategórie dopadu na úrovni označovanej ako midpoint – stredový indikátor. Typickým príkladom stredového indikátora globálneho otepľovania je schopnosť molekuly skleníkového efektu viazať tepelnú energiu.

Chemicko-fyzikálne a biologické deje zapríčinené elementárnym tokom na sebe obvykle nadväzujú v reťazci krokov vedúcich až ku konkrétnemu pozorovanému poškodeniu prostredia, ku konečnému merateľnému účinku označovaného ako endpoint – koncový indikátor. Endpointovými indikátormi globálneho otepľovania sú:

- zvyšovanie priemernej teploty atmosféry,
- zvyšovanie hladiny svetového oceánu,
- zmena dĺžky vegetačných období,
- geografický rozsah výskytu živočíšnych či rastlinných druhov,
- zvýšenie úmrtnosti ľudí v dôsledku zväčšovania rozlohy malarických oblastí.

Najčastejšie používaná metodika založená na midpointoch sa označuje ako CML. Ako prvou výhradne endpointovou metodikou je Eco-indicator 99 zameraný nielen na hodnotenie midpointov, ale aj na vyčísl'ovanie reálnych škôd v životnom prostredí. V angličtine sa metodike zameranej na endpointy hovorí „damage oriented“ alebo „top-down“. Ďalšou „damage oriented“ metodikou je EPS 2000, ktorá vyjadruje poškodenie životného prostredia monetárne, teda finančnou hodnotou. Perspektívnou metodikou kombinujúcou midpointové a endpointové kategórie dopadu je IMPACT 2002+. Ďalšími významnými LCIA metodikami sú EDIP 2003, ReCiPe a TRACI [4].

Kategórie environmentálnych vplyvov – klimatická zmena

Environmentálne kategórie vplyvov označujú rôzne kategórie vplyvu, ktoré sa zohľadňujú pri posudzovaní životného cyklu výrobku alebo služby. Tieto kategórie zvyčajne zahŕňajú faktory, ako sú emisie skleníkových plynov (GHG), spotreba energie, spotreba vody, využívanie pôdy a toxicita. Analýzou týchto kategórií sa posudzujú environmentálne vplyvy výrobku alebo služby počas celého životného cyklu, a to na rôznych úrovniach - globálnej, regionálnej a miestnej ako je to prezentované v štúdií autorov Hauschild a kol. [5]. Globálne

environmentálne ukazovatele monitorujú stav životného prostredia na celosvetovej úrovni vrátane emisií skleníkových plynov, kvality ovzdušia a vody, biodiverzity a odlesňovania, napríklad GWP - potenciál pre zmenu klímy, ODP - potenciál pre poškodzovanie ozónovej vrstvy a ADP-E - potenciál abiotického vyčerpania zdrojov pre prvky. Regionálne ukazovatele sa zameriavajú na konkrétny región a monitorujú kvalitu ovzdušia a vody, využívanie pôdy, biodiverzitu, odpady a spotrebu energie, ako napríklad potenciál acidifikácie AP, eutrofizácia EP a potenciál tvorby fotochemického ozónu POCP. Tieto merania pomáhajú identifikovať environmentálne problémy a formovať stratégie ochrany a udržateľného rozvoja. Miestne ukazovatele merajú stav životného prostredia v miestnej oblasti a zahŕňajú kvalitu ovzdušia a vody, odpadové hospodárstvo, zelené plochy, znečistenie hlukom a zapojenie komunity do environmentálnych iniciatív, ako sú potenciál abiotického vyčerpania zdrojov fosílnych palív ADP-FF a nedostatok vody WD [6].

Potenciál globálneho otepľovania (GWP)

Základným princípom je, že energia zo slnečného žiarenia vstupuje do zemskej atmosféry a opäť odchádza v rovnováhe, čo udržiava stabilný teplotný režim. Časť slnečného žiarenia je odrazená späť do vesmíru, časť je absorbovaná skleníkovými plynmi a zemským povrchom. Táto absorpcia zahrieva povrch planéty a vracia sa späť do atmosféry ako infračervené žiarenie. Infračervené žiarenie je čiastočne absorbované skleníkovými plynmi, čím sa udržiava v atmosfére a vedie k nárastu teploty v dôsledku skleníkových plynov. Tento proces je dôležitý pre pochopenie globálneho otepľovania. Potenciál globálneho otepľovania je relatívna miera toho, koľko tepla skleníkový plyn zachytáva v atmosfére. Potenciál globálneho otepľovania sa vypočítava v ekvivalentoch oxidu uhličitého, čo znamená, že skleníkový potenciál emisie je daný vo vzťahu k CO₂. Keďže čas zotrvania plynov v atmosfére je zahrnutý do výpočtu, časový rozsah pre hodnotenie je definovaný na 50, 60 alebo 100 rokov [7]. GWP porovnáva účinnosť látky v atmosfére po uvoľnení 1kg tejto látky v porovnaní s účinnosťou 1kg CO₂ za rovnaký časový úsek. CO₂ sa používa ako referenčný plyn v GWP, a akékoľvek zmeny v škodlivých dopadoch CO₂ ovplyvňujú GWP iných látok. Tento vzťah sa potom vyjadruje v jednotke CO_{2eq}, čo predstavuje ekvivalentné množstvo emisií CO₂ [8].

Potenciál globálneho otepľovania pre jednotlivé plyny je vypočítaný podľa vzorca:

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i \cdot C_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(t) dt}$$

a_i - absorpcia tepelného žiarenia (instantné žiarenie) po zvýšení jednej jednotky v koncentrácii plynu i ;

$C_i(t)$ - koncentrácia zostávajúceho plynu i v čase t po emisii;

T - počet rokov, pre ktoré je vykonané hodnotenie (napr. 20 alebo 100) [7].

Podľa normy EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 sa deklarujú štyri ukazovatele GWP, ktoré rozlišujú skleníkové plyny v závislosti od ich pôvodu: GWP-fosílny, GWP-biogénny, GWP-využívanie krajiny a zmena využívania krajiny (LULUC) a GWP-celkový (súčet ostatných troch ukazovateľov GWP) [9]. Okrem toho sa používa indikátor GWP-GHG, a to najmä v Environmentálnych vyhláseniach o produkte (EPD, Environmental Product Declaration). Tento

indikátor predstavuje GWP-celkový, za predpokladu, že charakterizačný faktor pre biogénne CO₂ je nastavený na nulu.

Tab. 3.1 Indikátory charakterizujúce hlavné vplyvy na životné prostredie [8]

Kategórie vplyvu	Skratka	Jednotka
Potenciál globálneho otepľovania celkový	GWP-celkový	kg CO _{2eq.}
Potenciál globálneho otepľovania fosílny	GWP-fosílny	kg CO _{2eq.}
Potenciál globálneho otepľovania biogénny	GWP-biogénny	kg CO _{2eq.bio}
Potenciál globálneho otepľovania, LULUC	GWP LULUC	kg CO _{2eq.}
Potenciál globálneho otepľovania, GHG	GWP-GHG	kg CO _{2eq.}

V sektore **obnovy budov** patrí potenciál globálneho otepľovania (GWP) medzi najvýznamnejšie environmentálne indikátory. Obnova obalových konštrukcií, modernizácia technických systémov budov a využívanie obnoviteľných zdrojov energie vedú k výraznému zníženiu prevádzkových emisií skleníkových plynov. Na druhej strane, samotná realizácia obnovy je spojená so zabudovanými emisiami vznikajúcimi pri výrobe stavebných materiálov, doprave a realizácii stavebných prác. Metóda LCA umožňuje posúdiť optimálnu rovnováhu medzi zabudovanými a prevádzkovými emisiami a identifikovať opatrenia s najvyšším potenciálom dekarbonizácie.

3.1.4. Interpretácia životného cyklu

Hlavnou úlohou v tejto fáze je analyzovať výsledky, vyvodiť závery, uviesť ohraničenia a obmedzenia štúdie, a poskytnúť odporúčania na základe výsledkov z predchádzajúcich fáz LCA a LCI. Výsledkom je správa o interpretácii životného cyklu, ktorá má poskytnúť komplexný prehľad výsledkov štúdie LCA, príp. LCI. Interpretačná fáza sa skladá z nasledovných častí:

- určenie významných problémov na základe výsledkov fáz LCI a LCIA v štúdiu LCA,
- hodnotenie problémov,
- závery, odporúčania a poukázanie na významné problémy.

Definovanie cieľa, predmetu a interpretačná fáza posudzovania životného cyklu tvoria jadro štúdie, pričom fázy LCI a LCIA predstavujú informácie o procesoch.

3.2 Hodnotenie ekonomických aspektov

Stavebníctvo je zodpovedné za nadmerné využívanie zdrojov, produkciu odpadu a emisií zo všetkých priemyselných odvetví. Princípy obehového hospodárstva - cirkulárnej ekonomiky (CE) ponúkajú prístup k vytvoreniu udržateľného zastavaného prostredia. Koncept obehového hospodárstva expanduje od konca 70. rokov 20. storočia. Súčasné chápanie obehového hospodárstva a jeho praktických aplikácií na ekonomické systémy a priemyselné procesy sa vyvinulo tak, aby zahŕňalo rôzne črty a príspevky rôznych konceptov, ktoré zdieľajú myšlienku uzavretých slučiek. Ekonomické hodnotenie vo forme modelu nákladov životného cyklu obehového hospodárstva (CE-LCC) je založené na existujúcich technikách kalkulácie životného cyklu a prispôbené tak, aby spĺňalo požiadavky produktov cirkulárnej ekonomiky. Model je navrhnutý tak, aby:

- považoval budovu za systém zložený zo stavebných konštrukcií, technických zariadení a komponentov s rozdielnou životnosťou;
- zohľadňoval viacnásobné cykly obnovy jednotlivých stavebných prvkov počas životnosti budovy;
- zahŕňal procesy demontáže, opätovného použitia, recyklácie a zhodnocovania materiálov po skončení ich životnosti;
- poskytoval praktické a použiteľné informácie projektantom, investorom, správcom budov a tvorcom politík;
- uľahčoval zosúladenie funkčnej jednotky a systémových hraníc s hodnotením environmentálnych dopadov metódou LCA [10].

Metóda Life Cycle Costing (LCC) sa používa na posúdenie ekonomickej hospodárnosti produktov. LCC je technika na výpočet celkových nákladov od kolísky po hrob alebo za zvolené časové obdobie, ktorá podporuje rozhodovacie procesy počas fázy vývoja produktu [10].

Náklady hodnotenia počas životného cyklu budov

Náklady na životný cyklus (LCC) sú spôsobom hodnotenia celkových nákladov spojených s vlastníctvom produktu, zahrňujúc náklady na nákup, vlastníctvo a likvidáciu budovy alebo stavebného systému. Táto metóda je užitočná pri porovnávaní rôznych projektov s rovnakými požiadavkami na výkon, ale s odlišnými počiatočnými a prevádzkovými nákladmi, s cieľom vybrať možnosť, ktorá maximalizuje čisté úspory [11]. Výpočet životného cyklu je ekonomická hodnotiaci technika používaná na hodnotenie rôznych investičných alternatív, berúc do úvahy náklady a úspory spojené s každou investičnou alternatívou počas obdobia analýzy, ktoré je často určené obdobím komerčného záujmu. V sektore stavebníctva sa používa na porovnanie rôznych alternatív návrhu alebo návrhu systému s ohľadom na náklady životného cyklu a úspory spojené s každou možnosťou návrhu. Technicky vychádza z princípov inžinierskej ekonomiky tak, aby náklady a výnosy boli porovnateľné s prihliadnutím na časovú hodnotu peňazí. Kalkulácia životného cyklu sa používa na zostavovanie rozpočtov životného cyklu a môže sa vykonávať v ktorejkoľvek fáze životného cyklu budovy. Po zavedení konceptu zelených budov na začiatku 90. rokov sa zvyšujú požiadavky na dôkladné posúdenie nákladov, a to počas celého životného cyklu budov. Tento prístup hodnotenia nákladov životného cyklu predstavuje metódu hodnotenia udržateľnosti na riešenie ekonomického piliera udržateľného rozvoja [12]. Existujú tri hlavné prístupy k LCC:

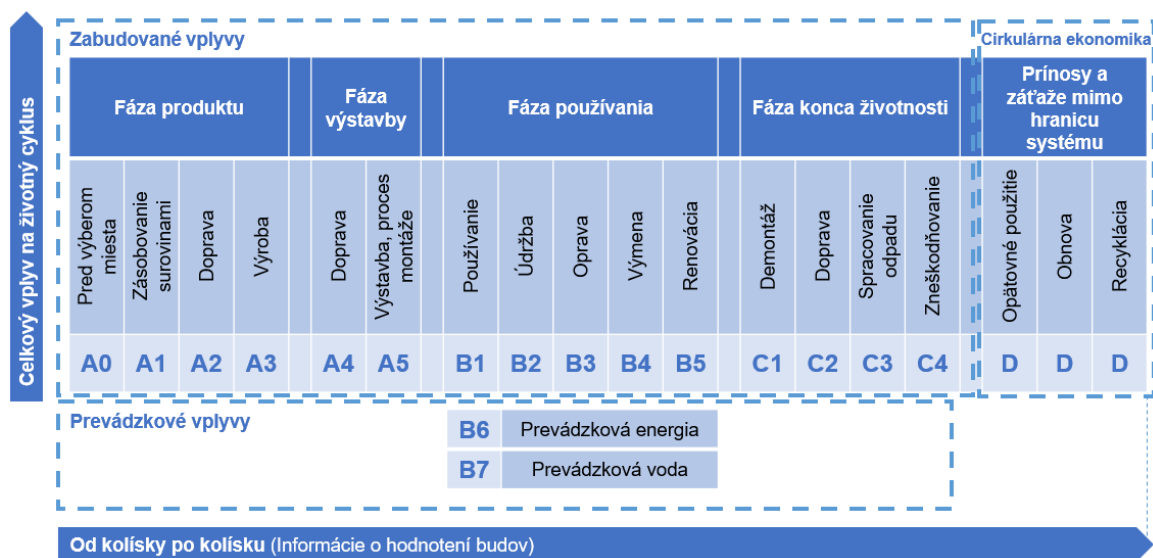
- konvenčné LCC (C-LCC),
- environmentálne LCC (E-LCC) a
- sociálne LCC (S-LCC).

C-LCC zahŕňa náklady na prevádzku a údržbu vo verejnom obstarávaní. Cieľom E-LCC je doplniť hodnotenie environmentálnych aspektov počas životného cyklu o kalkuláciu nákladov. S-LCC môže ďalej rozšíriť hranice analýzy tak, aby zahŕňala priame a nepriame náklady pokryté spoločnosťou [99]. Je to najpresnejší spôsob, ako zvýšiť úspory projektu budovy porovnaním rôznych alternatív návrhu. Na rozdiel od bežných výpočtov založených na návratnosti investícií LCC zohľadňuje dlhodobé náklady a úspory, ktoré sú vzájomne prepojené. Časť „životný cyklus“ znamená, že LCC posudzuje všetky náklady, ktoré vzniknú počas životnosti budovy, vrátane nákladov na výstavbu, údržbu, prevádzku a koniec životnosti [13].

Náklady na životný cyklus budovy zahŕňajú celkové náklady spojené s projektovaním a výstavbou budovy, prevádzkou a údržbou budovy, s výnimkou nákladov spojených s likvidáciou budovy na konci jej životného cyklu. Norma ISO 15686–5:2008 poskytuje jasné rozdelenie nákladov do štyroch hlavných kategórií:

- náklady na návrh a výstavbu, služby;
- prevádzkové náklady;
- náklady na údržbu;
- náklady na koniec životnosti.

Systémové hranice životného cyklu pre hodnotenie nákladov uvedené na obr. 3.4.



Obr. 3.4 Hranice systému v analýze nákladov životného cyklu

V rámci každej kategórie sú navrhnuté podrobnejšie zložky nákladov na pokrytie všetkých relevantných nákladov spojených s vlastníctvom budovy počas celého životného cyklu. Vo svojej podstate tieto postupné fázy zahŕňajú aj celý životný cyklus budovy. Norma ISO 15686-5:2008 a EN 16627 sa používa ako referencia na identifikáciu zložiek a prvkov nákladov životného cyklu, okrem údajov požadovaných na analýzu, ktorými sú:

- životnosť budovy;
- obdobie analýzy;
- budúca miera inflácie;
- diskontná sadzba;
- náklady na návrh a výstavbu;
- prevádzkové náklady budovy;
- náklady na údržbu budovy;
- náklady na koniec životnosti [12].

Nízke náklady životného cyklu (LCC) sú jednoduchým a zrozumiteľným ukazovateľom ekonomickej hodnoty. Ďalšie bežne používané ukazovatele zahŕňajú čisté úspory, pomer úspor k investíciám, vnútornú mieru návratnosti a dobu návratnosti. Ak tieto ukazovatele používajú rovnaké parametre a obdobie štúdie, sú v súlade s nízkymi nákladmi životného cyklu. S nadobudnutím, prevádzkou, údržbou a likvidáciou budovy alebo stavebného systému sú spojené rôzne náklady, ktoré sa zvyčajne delia do kategórií ako počiatočné náklady,

náklady na palivo, náklady na prevádzku, údržbu a opravy, náklady na výmenu, zvyškové hodnoty, finančné poplatky a nepeňažné výhody alebo náklady. Pre prijatie dôveryhodného investičného rozhodnutia je dôležité zvážiť len relevantné a významné náklady v každej kategórii. Náklady sú relevantné, ak sa líšia medzi alternatívami, a značné, ak majú významný vplyv na rozdiely medzi projektovými alternatívami [11]. Implementácia LCC by mala začať čo najskôr v projekte pred akýmkoľvek dôležitým rozhodnutím. Je dôležité, aby celý tím bol zapojený do tvorby alternatív, aby sa využil plný potenciál projektu. LCC by malo byť považované za kontinuálny proces a výpočty by sa mali opakovať počas rôznych fáz výstavby projektu [13].

Pri hodnotení variantov **obnovy budov** je potrebné okrem investičných nákladov zohľadniť aj budúce úspory energie, náklady na údržbu, výmenu technických zariadení a prípadné príjmy súvisiace s výrobou energie z obnoviteľných zdrojov. Metóda LCC umožňuje identifikovať ekonomicky optimálnu úroveň obnovy budovy počas celého referenčného obdobia hodnotenia.

3.3 Význam použitia LCA metódy pre dekarbonizáciu stavebníctva

Metóda LCA slúži nielen v rozhodovacom procese pri výbere environmentálne vhodných technológií, ale aj pre určenie prevádzkových postupov, ktorých dôsledky sú menšie s ohľadom na celý životný cyklus. Hlavné prínosy metódy posudzovania životného cyklu:

- Porovnávanie environmentálnych vplyvov budov s ohľadom na ich funkciu a rôzne fázy životného cyklu budovy.
- Hodnotenie environmentálnych vplyvov s ohľadom na celý životný cyklus budovy.
- Zavedenie systémovej hranice pre jasné vyjadrenie rozsahu budovy.
- Vyjadrovanie zásahov do životného prostredia nie výpočtom emisných tokov, ale použitím definovaných kategórií vplyvu – prevedenie hmotnostne vyjadrených emisných tokov na konkrétne hodnoty výsledkov indikátorov oblastí vplyvov.

Charakteristickou črtou metódy LCA je jej holistický prístup, ktorý zabezpečuje, že sú monitorované kompletné materiálové a energetické toky, čo umožňuje identifikovať všetky negatívne dopady spojené s jednotlivými fázami životného cyklu posudzovaných budov, ale súčasne zabráňuje posúvaniu problémov medzi týmito fázami.

Metóda LCA je základným metodologickým nástrojom dekarbonizácie stavebníctva, pretože umožňuje komplexne kvantifikovať environmentálne vplyvy budov a stavebných materiálov počas celého ich životného cyklu. Prostredníctvom identifikácie hlavných zdrojov emisií skleníkových plynov od ťažby surovín, výroby materiálov a výstavby až po prevádzku, obnovu a koniec životnosti budovy poskytuje podklady pre prijímanie efektívnych opatrení na znižovanie environmentálnych dopadov. Využívanie LCA tak podporuje výber nízkouhlíkových materiálov pre navrhovanie nových a obnovu existujúcich budov, optimalizáciu stavebných procesov a implementáciu princípov cirkulárnej ekonomiky, čím významne prispieva k dosahovaniu cieľov dekarbonizácie stavebného sektora.

Obnova existujúcich budov predstavuje jeden z najefektívnejších nástrojov dekarbonizácie stavebného sektora. Metóda LCA umožňuje komplexne hodnotiť environmentálne dôsledky jednotlivých opatrení obnovy vrátane zabudovaných emisií stavebných materiálov, prevádzkových emisií počas užívania budovy a environmentálnych dopadov súvisiacich s koncom životnosti stavebných výrobkov. Kombinácia metód LCA a LCC poskytuje podklady

pre navrhovanie environmentálne aj ekonomicky optimálnych riešení obnovy budov v súlade s princípmi udržateľnej výstavby, obehového hospodárstva a cieľmi klimatickej neutrality Európskej únie.

3.4 Analýza dekarbonizačného potenciálu a ekonomických aspektov obnovy vybraných budov

Realizácia stavebno-technickej obnovy budov prináša okrem ekonomických benefitov (zníženie účtov za energie) aj zásadné environmentálne prínosy. Stavebný sektor predstavuje jedného z hlavných aktérov v globálnom úsilí o dosiahnutie klimatickej neutrality [1]. Na Slovensku, v súlade s európskymi cieľmi Green Deal a národnými stratégiami dekarbonizácie, stojí pred sektorom budov obrovská výzva: transformovať existujúci fond budov na energeticky vysoko efektívny a nízko uhlíkový. Tradičné hodnotenie budov sa často zameriava iba na prevádzkovú fázu, no integrácia metodiky LCA poskytuje komplexný pohľad na celý životný cyklus [2, 3]. Pri rozhodovaní medzi demoláciou starej budovy a jej následnou novovýstavbou verzus komplexnou obnovou pôvodnej štruktúry jednoznačne dominuje obnova [4]. Ponechaním pôvodných nosných konštrukcií (základy, nosné steny, ŽB stropy) sa predchádza potrebe ťažby surovín a energeticky náročnej výroby nových materiálov, ako sú betón a oceľ. Ako ukazujú analýzy, fáza výroby materiálov nesie obrovské environmentálne zaťaženie [5, 6]. Správne navrhnutá obnova dokáže tieto „zabudované“ emisie zachovať v budove a neprodukovat' nové [7].

Pri budovách v pôvodnom stave je dominantným zdrojom znečistenia a emisií ich prevádzka. Výsledky LCA potvrdzujú, že operačná fáza (spotreba energie na vykurovanie, chladenie či osvetlenie) tvorí až 60 – 80 % celkových emisií CO₂e [8]. Cieľným zateplením nepriehľadného obvodového plášťa, hoci sú okná už plastové, dochádza k radikálnemu stlačeniu spotreby energie. Tým sa eliminujú desiatky rokov budúcich emisií skleníkových plynov [9, 10]. Vďaka LCA vieme navrhnuť obnovu tak, aby sme znížením prevádzkovej energie (napr. použitím extrémneho množstva syntetických izolácií s vysokou uhlíkovou stopou) nespôsobili veľký nárast znečistenia vo fáze výroby (Moduly A1–A3). Pomáha to nájsť optimálny materiálový balans (napr. voľbou prírodných alebo recyklovateľných izolantov). Hodnotenie obnovy cez LCA posúva stavebníctvo od prekonaného konceptu „energeticky pasívnej budovy“ k modernému konceptu „uhlíkovo neutrálnej budovy“ [11]. Umožňuje preukázať, že investícia do stavebných materiálov počas rekonštrukcie sa environmentálne vráti v podobe ušetrených emisií počas budúcich desaťročí prevádzky.

3.4.1 Metódy a materiály

Táto kapitola nadväzuje na predchádzajúci metodický rámec a špecifikuje jeho praktickú aplikáciu na vybraný súbor objektov. Predmetom posúdenia sú štyri konkrétne budovy verejnej infraštruktúry v podmienkach Slovenska: dve budovy základných škôl a dva kultúrne domy.

Na každom z týchto objektov sa komplexne hodnotia a porovnávajú alternatívne modely obnovy stavebných konštrukcií s cieľom demonštrovať prínos integrácie izolačných materiálov na báze obnoviteľných zdrojov (bio-materiálov) v porovnaní s konvenčnými riešeniami. S cieľom prepojiť ekologické kritériá s finančnou udržateľnosťou bola pre všetky štyri objekty a ich alternatívy aplikovaná kombinovaná metodika:

- Environmentálne hodnotenie (LCA): Realizované v najširšom rámci systémových hraníc „Cradle-to-Cradle“ (moduly A1 až D). Tento prístup umožňuje v module D

presne kvantifikovať a započítať čisté environmentálne prínosy, ktoré vyplývajú z vysokého potenciálu recyklácie a materiálového zhodnotenia aplikovaných bio-materiálov po skončení životnosti budov.

- Ekonomické hodnotenie (LCC): Náklady na životný cyklus zahŕňajú počiatočné investičné výdavky na realizáciu rekonštrukcie, ako aj budúce náklady na prevádzku, údržbu a finálne zhodnotenie či zneškodnenie materiálov.

Funkčná jednotka (FU): Pre potreby analýzy a vzájomnej komparácie bola funkčná jednotka definovaná ako 1 m² konštrukcie s predpokladanou životnosťou 50 rokov.

3.4.2 Softvérové nástroje a dátové zdroje

Kvantifikácia environmentálnych indikátorov bola realizovaná v špecializovanom softvéri OneClickLCA (OCL). Výpočty prebiehali v súlade s medzinárodnými normami STN EN ISO ISO (ISO 14040 [13], ISO 14025 [16], ISO 14067 [17] a ISO 14020 [18] a európskou normou EN 15804+A2/AC [15]. Softvér OCL pracuje v súlade s hodnotiacim nástrojom Level(s) Life Cycle Assessment Tool, ktorý striktnie využíva európsku metodiku PEF 3.0 (Product Environmental Footprint). Metodika PEF, vyvinutá Európskou komisiou, predstavuje štandardizovaný prístup k meraniu environmentálnej stopy produktov a budov, pričom sa opiera o kľúčové normy ISO (ISO 14040 [13], ISO 14025 [16], ISO 14067 [17] a ISO 14020 [18]). Prístupy PEF aj EPD sa v súčasnosti považujú za najrobustnejšie nástroje na kvantifikáciu environmentálnych vplyvov v stavebníctve. Pre zabezpečenie geografickej a technologickej reprezentatívnosti pre SR boli kombinované nasledovné dáta:

- Primárne dáta: Overené environmentálne vyhlásenia o produkte (EPD) podľa EN 15804+A2/AC, reflektujúce špecifické podmienky lokálnej výroby (najmä pri posudzovaných bio-materiáloch).
- Sekundárne dáta: Satelitné databázy Ecoinvent a GaBi, použité v prípadoch, kedy neboli špecifické EPD dostupné. Všetky dátové sady boli harmonizované na rovnakú funkčnú jednotku a časový rámec.

Literatúra

1. STN EN ISO 14040:2007 Environmentálne manažérstvo. Posudzovanie životného cyklu. Princípy a štruktúra.
2. STN EN ISO 14044:2007 Environmentálne manažérstvo. Posudzovanie životného cyklu. Požiadavky a pokyny.
3. EN 15978:2011 Trvalá udržateľnosť výstavby. Posudzovanie environmentálnej hospodárnosti budov.
4. Kočí V.: Environmentální dopady: Posuzování životního cyklu. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha, 2013
5. Hauschild, M.Z. Introduction to LCA methodology. Life cycle assessment: theory and practice, 2018, 59-66.
6. Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I. Life cycle assessment. Springer International Publishing, Cham.
7. Tanaka, K., et al. Evaluating global warming potentials with historical temperature. Climatic change, 2009, 96.4: 443-466.
8. Azar, Ch., Johansson, D.J.A. On the relationship between metrics to compare greenhouse gases—the case of IGTP, GWP and SGTP. Earth System Dynamics, 2012, 3.2: 139-147.
9. STN EN 15804:2012+A2:2019+AC:2023: Trvalá udržateľnosť výstavby. Environmentálne vyhlásenia o produktoch. Základné pravidlá skupiny stavebných produktov.

10. Mendoza B.A. et al. (2020). Circular economy indicators and life cycle assessment: A systematic literature review. *Journal of Industrial Ecology*, 24(3), 513–525.
11. Fuller, S. Life-cycle cost analysis (LCCA). National Institute of Building Sciences, An Authoritative Source of Innovative Solutions for the Built Environment, 2010, 1090.
12. Dwaikat, L.N.; Ali, K.N. Green buildings life cycle cost analysis and life cycle budget development: Practical applications. *Journal of Building Engineering*, 2018, 18: 303-311.
13. ONECLICK LCA. Automate LCC calculations and reduce lifetime costs of buildings. 2022 [online] [cit. 2024-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.oneclicklca.com/construction/life-cycle-costing-software/>

4 Vegetačné strechy v procese obnovy budov

4.1 Klimatická zmena, urbanizácia a potreba obnovy existujúcich budov

Mestá predstavujú centrá hospodárskeho, spoločenského a technologického rozvoja, pričom súčasne patria medzi územia najvýraznejšie ovplyvnené dôsledkami klimatickej zmeny. Vysoká koncentrácia obyvateľstva, intenzívne využívanie zastavaných plôch a rastúci podiel nepriepustných povrchov spôsobujú zmenu prirodzených procesov kolobehu vody a energie v urbanizovanom prostredí. V dôsledku týchto zmien sa mestské územia stávajú citlivejšími na extrémne prejavy počasia, najmä na vlny horúčav, prívalové zrážky a obdobia sucha.

Urbanizácia v posledných desaťročiach významne ovplyvnila charakter krajiny. Prirodzené vegetačné plochy boli vo veľkej miere nahradené budovami, komunikáciami a spevnenými povrchmi, ktoré vykazujú odlišné tepelné a hydrologické vlastnosti než pôvodné prírodné prostredie. Tieto zmeny vedú k zvýšenému povrchovému odtoku zrážkových vôd, obmedzeniu prirodzeného vsakovania a zníženiu evapotranspirácie. Súčasne dochádza k akumulácii tepla v stavebných konštrukciách a povrchoch, čo prispieva k vzniku fenoménu mestského tepelného ostrova.

Mestský tepelný ostrov predstavuje jeden z najvýznamnejších prejavov zmeny mikroklimy urbanizovaných území. Teploty vzduchu a povrchov v zastavanom prostredí môžu byť počas letných období o niekoľko stupňov Celzia vyššie v porovnaní s okolitou krajinou. Tento jav negatívne ovplyvňuje tepelnú pohodu obyvateľov, zvyšuje energetickú náročnosť budov na chladenie a súčasne zhoršuje kvalitu mestského prostredia. Význam problému narastá najmä v súvislosti s predpokladaným rastom frekvencie a intenzity extrémnych teplotných udalostí v podmienkach strednej Európy.

Popri rastúcom tepelnom zaťažení sa mestá čoraz častejšie stretávajú aj s problémami súvisiacimi s hospodárením so zrážkovou vodou. Intenzívne dažde spôsobujú preťaženie kanalizačných systémov a lokálne záplavy, zatiaľ čo dlhšie obdobia bez zrážok vedú k prehrievaniu povrchov a znižovaniu dostupnosti vody pre vegetáciu. Tradičné technické riešenia založené na rýchlom odvádzaní dažďovej vody mimo urbanizovaného územia sa preto postupne ukazujú ako nedostatočné. Moderné prístupy smerujú k zadržaniu, využitiu a postupnému uvoľňovaniu zrážkovej vody priamo v mieste jej dopadu.

V reakcii na uvedené problémy sa v posledných rokoch rozvíjajú koncepty udržateľného mestského rozvoja založené na využívaní prvkov modrej a zelenej infraštruktúry. Tieto opatrenia sa snažia obnoviť prirodzené procesy kolobehu vody a energie v urbanizovanom prostredí a zároveň zvýšiť odolnosť miest voči dôsledkom klimatickej zmeny. Medzi najvýznamnejšie prvky patria vegetačné strechy, vegetačné steny, dažďové záhrady, retenčné systémy, mokrakové prvky a ďalšie prírode blízke riešenia podporujúce retenciu vody a znižovanie tepelného zaťaženia.

Osobitné postavenie v procese adaptácie miest majú existujúce budovy. Na území Slovenska tvorí prevažnú časť stavebného fondu zástavba realizovaná v druhej polovici 20. storočia, ktorá vznikala v odlišných klimatických, energetických a spoločenských podmienkach. Zvyšujúce sa požiadavky na energetickú hospodárnosť budov, znižovanie emisií skleníkových plynov a adaptáciu na klimatickú zmenu vytvárajú potrebu komplexnej obnovy týchto objektov. Súčasná obnova budov už preto nezahŕňa iba znižovanie tepelných strát prostredníctvom

zatepľovania obvodového plášťa, ale čoraz viac sa orientuje aj na zlepšovanie mikroklimatických podmienok, hospodárenie so zrážkovou vodou a zvyšovanie environmentálnej kvality zastavaného prostredia.

V tomto kontexte predstavujú vegetačné strechy jedno z najperspektívnejších adaptačných opatrení aplikovateľných pri rekonštrukciách a obnovách budov. Okrem schopnosti zadržiavať zrážkovú vodu a podporovať biodiverzitu ovplyvňujú aj tepelný režim strešných konštrukcií, stabilizujú povrchové teploty a môžu prispievať k znižovaniu energetickej náročnosti budov. Ich účinnosť však závisí od mnohých faktorov, medzi ktoré patrí skladba strešného plášťa, hrúbka vegetačného substrátu, obsah vody v jednotlivých vrstvách, klimatické podmienky a spôsob prevádzky budovy.

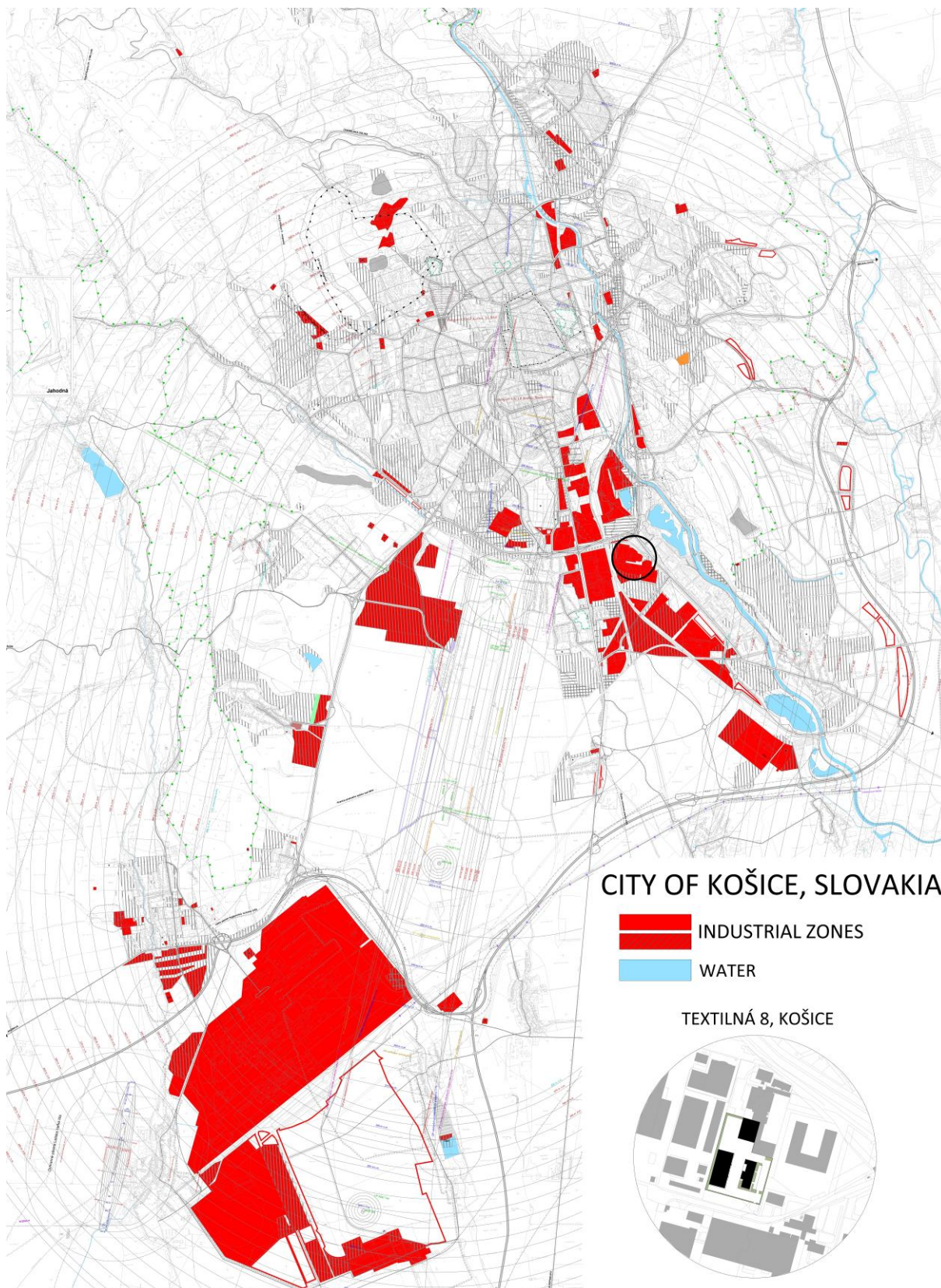
Z uvedených dôvodov je nevyhnutné overovať správanie vegetačných konštrukcií v reálnych prevádzkových podmienkach. Experimentálne projekty umožňujú analyzovať nielen ich hydrologické a ekologické funkcie, ale aj vplyv na energetické správanie budov počas celého roka. Význam takýchto experimentálnych pracovísk rastie najmä v podmienkach strednej Európy, kde sú doteraz dostupné údaje o dlhodobom správaní vegetačných striech stále pomerne obmedzené. Jedným z takýchto pracovísk je projekt greenIZOLA, ktorý vytvára experimentálnu platformu pre výskum vegetačných konštrukcií a ich uplatnenia pri obnove budov a adaptácii urbanizovaného prostredia na meniace sa klimatické podmienky.

4.2 Projekt greenIZOLA ako experimentálna platforma

Využívanie vegetačných konštrukcií v urbanizovanom prostredí si vyžaduje podrobné poznanie ich dlhodobého správania v reálnych prevádzkových podmienkach. Hoci sú vegetačné strechy, vegetačné steny a ďalšie prvky modro-zelenej infraštruktúry v súčasnosti intenzívne skúmané vo viacerých krajinách Európy, výsledky zahraničných štúdií nie je možné bezprostredne prenášať do podmienok Slovenska. Tepelné a hydrologické správanie vegetačných konštrukcií je významne ovplyvnené klimatickými podmienkami, skladbou konštrukcie, vegetačným krytom, vodným režimom a spôsobom prevádzky budovy. Z uvedeného dôvodu vznikla potreba vytvoriť experimentálnu platformu umožňujúcu dlhodobé monitorovanie vegetačných konštrukcií v podmienkach stredoeurópskeho klimatického pásma.

Projekt greenIZOLA vznikol ako spoločná iniciatíva spoločnosti Izola Košice, s.r.o. a Stavebnej fakulty Technickej univerzity v Košiciach. Jeho základnou myšlienkou bolo vytvorenie experimentálneho pracoviska, ktoré by umožňovalo overovanie fyzikálneho správania vegetačných konštrukcií v reálnych podmienkach a súčasne demonštrovalo možnosti transformácie existujúcich priemyselných areálov prostredníctvom prvkov modrej a zelenej infraštruktúry.

Experimentálne pracovisko sa nachádza v priemyselnej zóne mesta Košice na ulici Textilná 8, v areáli spoločnosti Izola Košice. Lokalita (obr. 4.1) predstavuje typické priemyselné prostredie charakterizované vysokým podielom spevnených a nepriepustných plôch, nízkym zastúpením vegetácie a zvýšenou mierou tepelného zaťaženia počas letného obdobia. Takéto podmienky vytvárajú vhodné prostredie na skúmanie účinnosti adaptačných opatrení zameraných na zmierňovanie negatívnych dôsledkov klimatickej zmeny.



Obr. 4.1 Priemyselné zóny mesta Košice a lokalizácia experimentálneho areálu greenIZOLA na ulici Textilná 8

Areál greenIZOLA bol postupne transformovaný z pôvodného priemyselného priestoru na experimentálnu platformu pozostávajúcu z viacerých výskumných plôch a demonštračných

objektov. Jednotlivé realizácie boli navrhnuté tak, aby umožňovali hodnotenie rôznych typov vegetačných konštrukcií z hľadiska ich hydrologických, mikroklimatických a stavebnofyzikálnych vlastností. Súčasťou areálu sa postupne stali experimentálne vegetačné strechy, mokradňová strecha, vegetačné steny, biosolárne systémy a intenzívne vegetačné plochy.

Významnou charakteristikou projektu je jeho dlhodobý výskumný charakter. Na rozdiel od krátkodobých experimentov realizovaných v laboratórnych podmienkach umožňuje greenIZOLA sledovať správanie jednotlivých konštrukčných riešení počas viacerých rokov prevádzky a počas rôznych klimatických situácií. Takto získané údaje poskytujú cenné informácie o sezónnych zmenách tepelného režimu, vodnej bilancii vegetačných vrstiev, energetickom správaní strešných konštrukcií a ich adaptačnom potenciáli v podmienkach meniacej sa klímy.

Projekt zároveň vytvára jedinečnú experimentálnu infraštruktúru pre výskum možností uplatnenia vegetačných konštrukcií pri obnove existujúcich budov. Osobitná pozornosť je venovaná hodnoteniu vplyvu vegetačných striech na tepelný režim strešných plášťov, hustotu tepelného toku a energetické správanie budov. Výsledky získané v rámci projektu predstavujú významný podklad pre navrhovanie adaptačných opatrení v mestskom prostredí a pre rozvoj metodických odporúčaní pre obnovu budov v podmienkach Slovenska.

4.3 Implementácia prvkov modrej a zelenej infraštruktúry v projekte greenIZOLA

Návrh transformácie areálu spoločnosti Izola Košice bol rozdelený do ôsmich realizačných etáp (obr. 4.2).



Obr. 4.2 Pohľad na strešné konštrukcie areálu s rozdelením na jednotlivé fázy projektu greenIZOLA

Jednotlivé fázy predstavujú postupnú implementáciu vegetačných konštrukcií a ďalších prvkov modrej a zelenej infraštruktúry do existujúceho priemyselného prostredia. Cieľom

navrhovaných opatrení bolo zvýšenie podielu vegetácie, zlepšenie hospodárenia so zrážkovou vodou, zmiernenie prehrievania konštrukcií a vytvorenie experimentálnej platformy umožňujúcej výskum vegetačných systémov v podmienkach Slovenska.

Z pôvodne navrhovaných ôsmich etáp bolo do roku 2025 realizovaných šesť. Nerealizované zostali fáza 6 – vegetačná stena na východnej a južnej fasáde objektu a fáza 7 – biosolárna strecha kombinujúca vegetačný systém s fotovoltaickými panelmi. Napriek tomu vytvorená infraštruktúra predstavuje rozsiahly experimentálny areál umožňujúci dlhodobý výskum energetických, mikroklimatických a environmentálnych prínosov vegetačných konštrukcií.

Fáza 1 – Experimentálna strecha s biodiverzným potenciálom (*realizovaná*)

Prvá etapa projektu bola zameraná na vytvorenie experimentálnej vegetačnej strechy na južnej terase objektu. Cieľom bolo vytvoriť výskumnú platformu umožňujúcu dlhodobé monitorovanie tepelného a energetického správania vegetačných striech s rôznou hrúbkou substrátu v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou. Zrealizovaná experimentálna plocha je zdokumentovaná na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Experimentálna vegetačná strecha na južnej terase 2. NP

Fáza 2 – Prístrešok s tromi rôznymi skladbami vegetačnej strechy (*realizovaná*)

Druhá etapa rozšírila experimentálnu infraštruktúru o samostatný prístrešok s tromi rôznymi skladbami vegetačných striech. Realizácia umožnila porovnávať správanie rôznych typov vegetačných systémov v identických klimatických podmienkach. Výsledná konštrukcia je zobrazená na obr. 4.4.

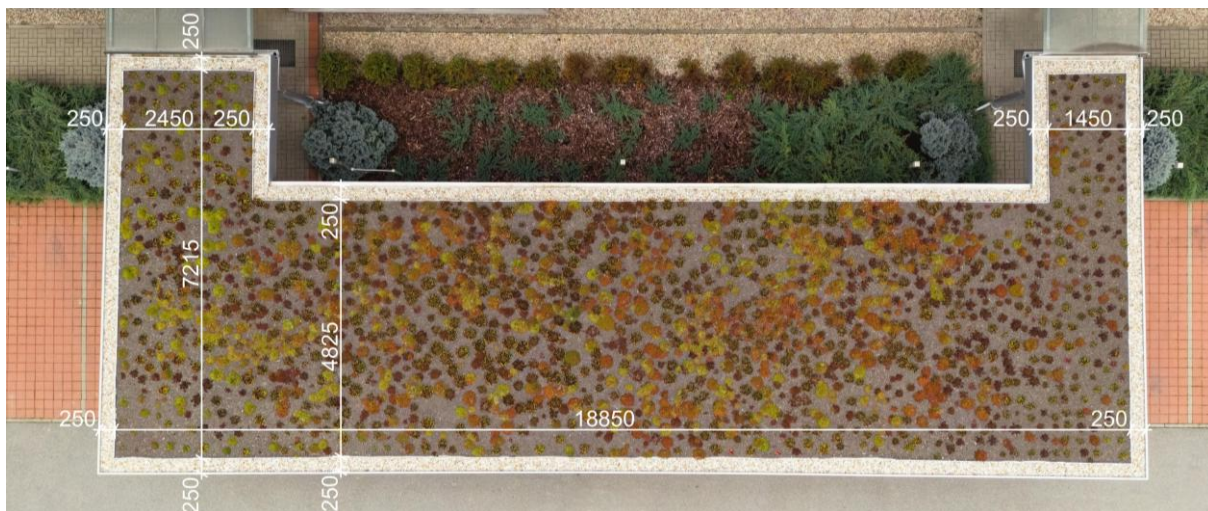


Obr. 4.4 Fáza 2 prístrešok pre skladovanie materiálu s vegetačnými strechami a ich skladbami foto: august 2021

Fáza 3 – Carport s vegetačnou strechou (*realizovaná*)

Tretia etapa predstavovala realizáciu vegetačnej strechy na konštrukcii parkovacieho prístrešku. Okrem výskumného významu išlo aj o demonštráciu možnosti aplikácie

vegetačných systémov na ľahkých oceľových konštrukciách. Pohľad na realizovaný carport je uvedený na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Carport s extenzívnou vegetačnou strechou foto: november 2022, rok po výsadbe rastlín

Fáza 4 – Nadstavba na západnej terase 2. NP (realizovaná)

V rámci štvrtej etapy bola realizovaná nadstavba na západnej terase objektu. Novovzniknutá strešná plocha vytvorila ďalší priestor pre aplikáciu vegetačných systémov a ich následný výskum. Realizácia nadstavby je znázornená na obr. 4.6.



Obr. 4.6 Západná terasa a prepojenie systému vegetačnej strechy nad nadstavbou s mokradovou strechou

Fáza 5 – Vegetačná strecha na severnej terase 4. NP (realizovaná)

Piata etapa rozšírila využitie vegetačných striech na ďalšiu časť objektu. Vznikla nová experimentálna plocha umožňujúca sledovanie správania vegetačnej strechy v odlišných

prevádzkových a expozičných podmienkach. Pohľad na realizovanú strechu je uvedený na obr. 4.7.



Obr. 4.7 Vegetačná strecha na severnej terase 4. NP

Fáza 6 – Vegetačná stena na východnej a južnej fasáde budovy (navrhovaná etapa – nerealizovaná)

Súčasťou transformačného konceptu bolo aj vytvorenie vegetačnej steny na vybraných fasádach objektu. Navrhované riešenie má za úlohu v budúcnosti rozšíriť výskum o vertikálne vegetačné systémy a ich vplyv na mikroklimatické a energetické správanie budovy. Vizualizácia navrhovaného riešenia je uvedená na obr. 4.8.

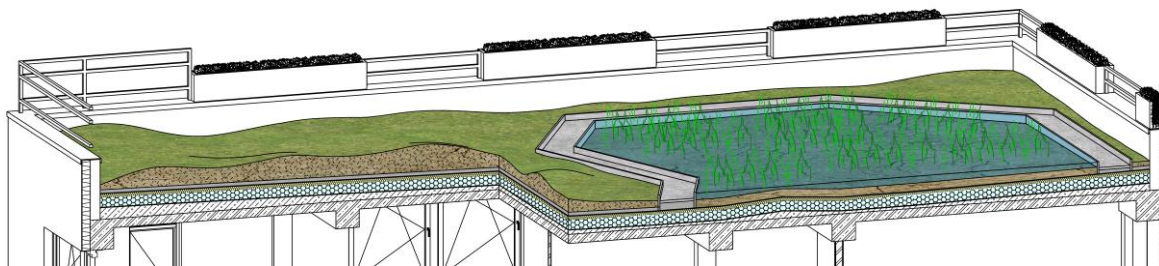


Obr. 4.8 Návrh vegetačnej steny na fasáde objektu

Fáza 7 – Biosolárna strecha (navrhovaná etapa – nerealizovaná)

Navrhovaná biosolárna strecha mala kombinovať vegetačný systém s fotovoltaickými panelmi. Cieľom tejto fázy bude overiť možnosti synergického pôsobenia vegetácie a výroby elektrickej

energie v podmienkach priemyselného areálu. Konceptný návrh biosolárnej strechy je zobrazený na obr. 4.9.



Obr. 4.9 Návrh biosolárnej strechy kombinujúcej vegetáciu a fotovoltické panely

Fáza 8 – Intenzívna vegetačná strecha – park na terase (realizovaná)

Posledná etapa predstavovala realizáciu intenzívnej vegetačnej strechy na severnej terase 2. NP. Vznikol priestor s charakterom strešného parku, ktorý okrem environmentálnych a mikroklimatických funkcií plní aj rekreačnú a estetickú úlohu. Výsledná podoba strešného parku je zdokumentovaná na obr. 4.10.



Obr. 4.10 Intenzívna vegetačná strecha na severnej terase 2. NP

Spomedzi všetkých realizovaných etáp mala z pohľadu výskumu najväčší význam prvá etapa predstavujúca experimentálnu vegetačnú strechu s biodiverzným potenciálom. Táto konštrukcia sa stala základnou výskumnou platformou projektu greenIZOLA a umožnila realizáciu dlhodobého monitoringu teplotného režimu, hustoty tepelného toku a energetického správania vegetačných striech v reálnych klimatických podmienkach.

4.4 Experimentálna vegetačná strecha s biodiverzným potenciálom

V rámci prvej etapy projektu greenIZOLA bola na južnej terase administratívnej budovy realizovaná experimentálna vegetačná strecha s biodiverzným potenciálom. Hlavným cieľom

tejto realizácie bolo vytvorenie dlhodobej výskumnej infraštruktúry umožňujúcej sledovanie tepelného, vlhkostného a energetického správania vegetačných striech v podmienkach Slovenska. Súčasne bolo zámerom vytvoriť strešný ekosystém podporujúci biodiverzitu a overiť možnosti využitia vegetačných striech ako adaptačného opatrenia pri obnove existujúcich budov.

Experimentálna strecha bola navrhnutá na existujúcej strešnej terase objektu spoločnosti Izola Košice. Výber lokality bol podmienený vhodnými technickými parametrami strešnej konštrukcie, jednoduchou dostupnosťou pre výskumné účely a možnosťou dlhodobého monitorovania. Poloha experimentálnej strechy v rámci areálu greenIZOLA je znázornená na obr. 4.11.



Obr. 4.11 Umiestnenie experimentálnej vegetačnej strechy v rámci areálu greenIZOLA

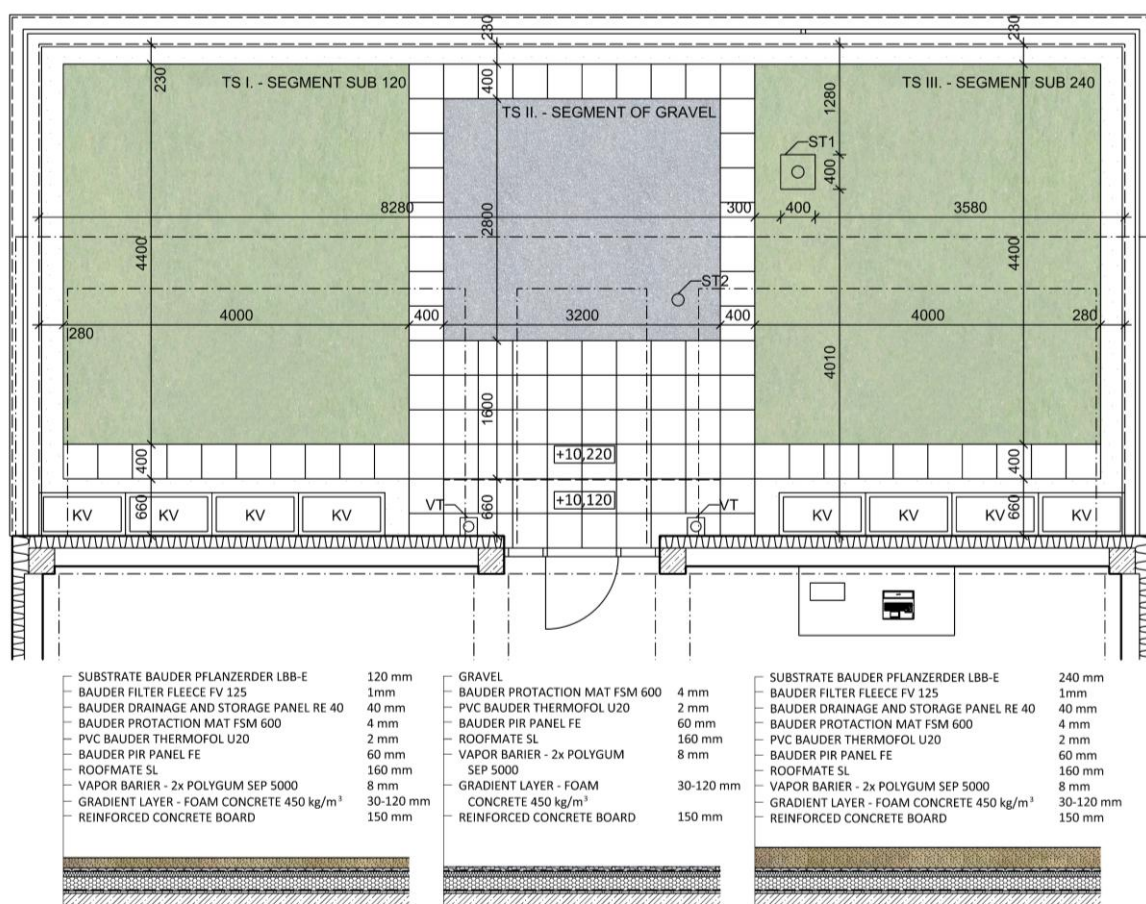
Prípravná fáza projektu prebiehala v období od februára do apríla 2020. Zahŕňala návrh experimentu, prípravu projektovej dokumentácie, výber vhodných materiálov a realizáciu úprav existujúcej strešnej konštrukcie. Súčasťou prípravných prác bolo aj vytvorenie podmienok pre následné osadenie meracej infraštruktúry. Priebeh prípravných a realizačných prác je zdokumentovaný na obr. 4.12.





Obr. 4.12 Príprava strešnej konštrukcie pred realizáciou experimentálnej vegetačnej strechy

Pôvodná strešná terasa bola navrhnutá ako obrátená strecha. Pre potreby experimentu bola skladba modifikovaná tak, aby umožňovala realizáciu vegetačných systémov a zabudovanie meracích zariadení. Súčasne boli vytvorené podmienky pre spoľahlivé dlhodobé monitorovanie fyzikálnych procesov prebiehajúcich v jednotlivých vrstvách strešného plášt'a.



Obr. 4.13 Rozdelenie experimentálnej strechy na segmenty S1, S2 a S3

Experimentálna plocha bola následne rozdelená na tri samostatné segmenty označené S1, S2 a S3. Segment S2 predstavoval referenčnú štrkovú strechu bez vegetácie. Segmenty S1 a S3 boli navrhnuté ako extenzívne vegetačné strechy s rozdielnou hrúbkou vegetačného

substrátu. Takéto usporiadanie umožnilo porovnanie vplyvu vegetačnej vrstvy a hrúbky substrátu na správanie strešnej konštrukcie počas celoročnej prevádzky. Rozdelenie experimentálnej strechy na jednotlivé segmenty je znázornené na obr. 4.13. Z pohľadu vegetačného riešenia bol návrh založený na kombinácii druhov vhodných pre extenzívne vegetačné strechy s doplnením rastlín podporujúcich vyššiu biodiverzitu prostredia. Cieľom nebolo vytvoriť iba štandardnú vegetačnú strechu, ale experimentálnu plochu umožňujúcu sledovať dlhodobý vývoj vegetačného spoločenstva a jeho interakciu so stavebnou konštrukciou. Vývoj vegetačného krytu počas prvých rokov prevádzky je dokumentovaný na obr. 4.14.



Obr. 4.14 Vývoj vegetačného krytu experimentálnej strechy s biodiverzným potenciálom

Po ukončení realizačných prác vznikla unikátna experimentálna platforma umožňujúca dlhodobý výskum vegetačných striech v podmienkach stredoeurópskeho klimatického pásma. V nasledujúcich rokoch bola strecha využívaná na monitorovanie teplotného režimu, hustoty tepelného toku, zadržiavania zrážkovej vody a ďalších parametrov súvisiacich s energetickým a environmentálnym správaním vegetačných konštrukcií. Význam experimentálnej strechy sa v priebehu rokov ďalej rozšíril. Referenčný segment S2 bol v roku 2022 prestavaný na experimentálnu mokrad'ovú strechu, čím vznikla možnosť porovnania klasickej extenzívnej vegetačnej strechy a strechy s trvalo zvýšenou zásobou vody. Táto transformácia predstavovala ďalší krok vo vývoji experimentálnej infraštruktúry projektu greenIZOLA a je znázornená na obr. 4.15.

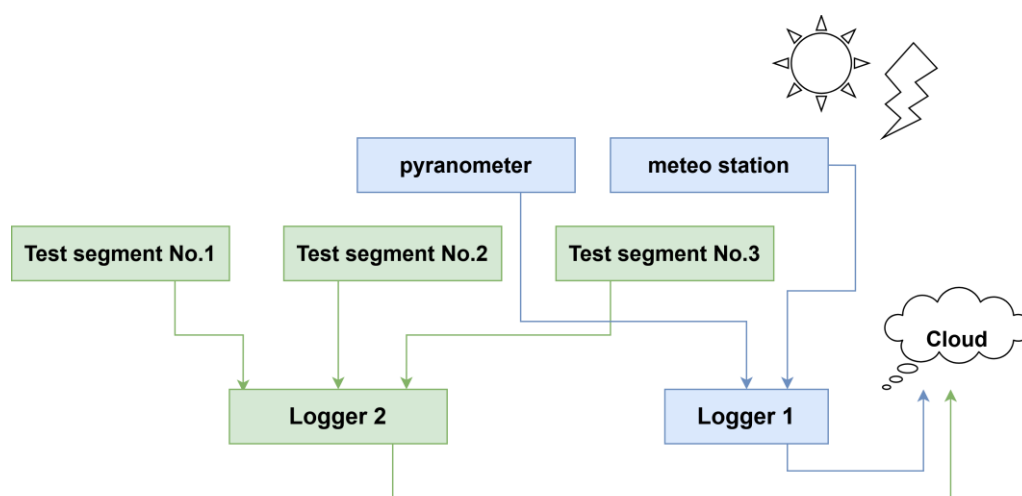


*Obr. 4.15 Transformácia referenčného segmentu na experimentálnu mokrad'ovú strechu
foto: september 2022*

4.5 Meracia infraštruktúra a metodika monitoringu

Jedným z hlavných cieľov projektu greenIZOLA bolo vytvorenie experimentálneho pracoviska umožňujúceho dlhodobé sledovanie fyzikálnych procesov prebiehajúcich vo vegetačných strechách v reálnych klimatických podmienkach. Z tohto dôvodu bola experimentálna strecha s biodiverzným potenciálom vybavená rozsiahlym meracím systémom umožňujúcim kontinuálny záznam klimatických parametrov, teplotného poľa strešnej konštrukcie a hustoty tepelného toku.

Meracia infraštruktúra bola navrhnutá tak, aby umožňovala súčasné sledovanie okrajových klimatických podmienok a fyzikálnych procesov prebiehajúcich v jednotlivých experimentálnych segmentoch. Základ systému tvorili dva samostatné meracie okruhy. Prvý bol určený na monitorovanie meteorologických podmienok a druhý zabezpečoval záznam údajov zo senzorov zabudovaných priamo do strešnej konštrukcie. Schéma meracieho systému je uvedená na obr. 4.16.



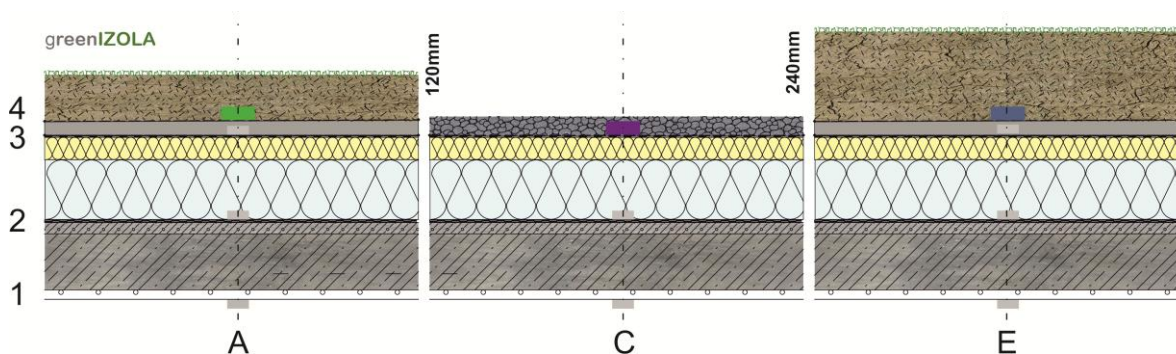
Obr. 4.16 Schéma experimentálneho meracieho systému

Na monitorovanie meteorologických parametrov bola použitá automatická meteorologická stanica doplnená o snímače globálneho slnečného žiarenia, teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, smeru a rýchlosti vetra a zrážok. Získané údaje slúžili ako vstupné informácie pre interpretáciu teplotného režimu a energetického správania experimentálnych strešných segmentov.

Súčasťou experimentálnej infraštruktúry boli aj dátové záznamníky systému AHLBORN ALMEMO, ktoré zabezpečovali zber, archiváciu a následné spracovanie meraných údajov. Všetky merania boli realizované automaticky počas celej doby prevádzky experimentu, čím vznikla rozsiahla databáza údajov umožňujúca vyhodnocovanie krátkodobých aj dlhodobých zmien.

Osobitná pozornosť bola venovaná meraniu teploty v jednotlivých vrstvách strešnej konštrukcie. Teplotné snímače boli umiestnené v identických polohách vo všetkých experimentálnych segmentoch tak, aby bolo možné objektívne porovnávať správanie vegetačných a referenčných systémov. Rozmiestnenie senzorov bolo navrhnuté s dôrazom na monitorovanie teploty hydroizolačnej vrstvy, ktorá predstavuje jednu z najviac namáhaných častí strešného plášťa.

Poloha jednotlivých teplotných snímačov a tepelnotokových dosiek v experimentálnych segmentoch je uvedená na obr. 4.17.

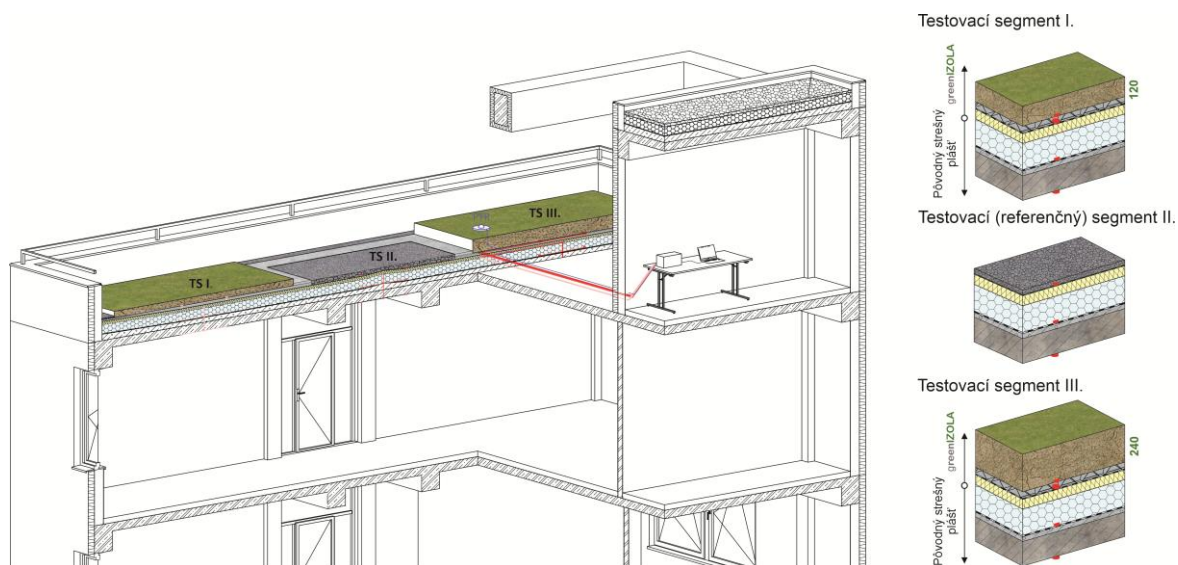


Obr. 4.17 Umiestnenie teplotných senzorov a snímačov hustoty tepelného toku v experimentálnych segmentoch

Teplotné merania boli realizované pomocou odporových snímačov Pt100. Sensory boli osadené vo viacerých úrovniach strešnej konštrukcie, čo umožnilo sledovať šírenie teplotných zmien od povrchu vegetačnej vrstvy až po nosnú časť strešného plášťa. Takéto usporiadanie vytvorilo predpoklady pre podrobnú analýzu teplotnej stability jednotlivých strešných systémov.

Okrem teploty bola monitorovaná aj hustota tepelného toku prechádzajúceho strešnou konštrukciou. Na tento účel boli použité tepelnotokové dosky osadené v identických polohách všetkých experimentálnych segmentov. Získané údaje umožnili hodnotiť okamžité tepelné straty a zisky a následne analyzovať energetické prínosy vegetačných vrstiev počas zimného aj letného obdobia.

Pre potreby numerických simulácií a následnej interpretácie výsledkov bol vytvorený aj priestorový model experimentálnej strechy. Model obsahoval presnú geometriu jednotlivých segmentov, skladbu konštrukcie a polohu meracích zariadení. Vizualizácia experimentálneho modelu je uvedená na obr. 4.18.



Obr. 4.18 Priestorový model experimentálnej vegetačnej strechy a poloha meracích bodov

Prehľad použitých meracích zariadení, ich technických parametrov a meraných veličín je uvedený v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Prehľad použitých meracích zariadení a monitorovaných veličín

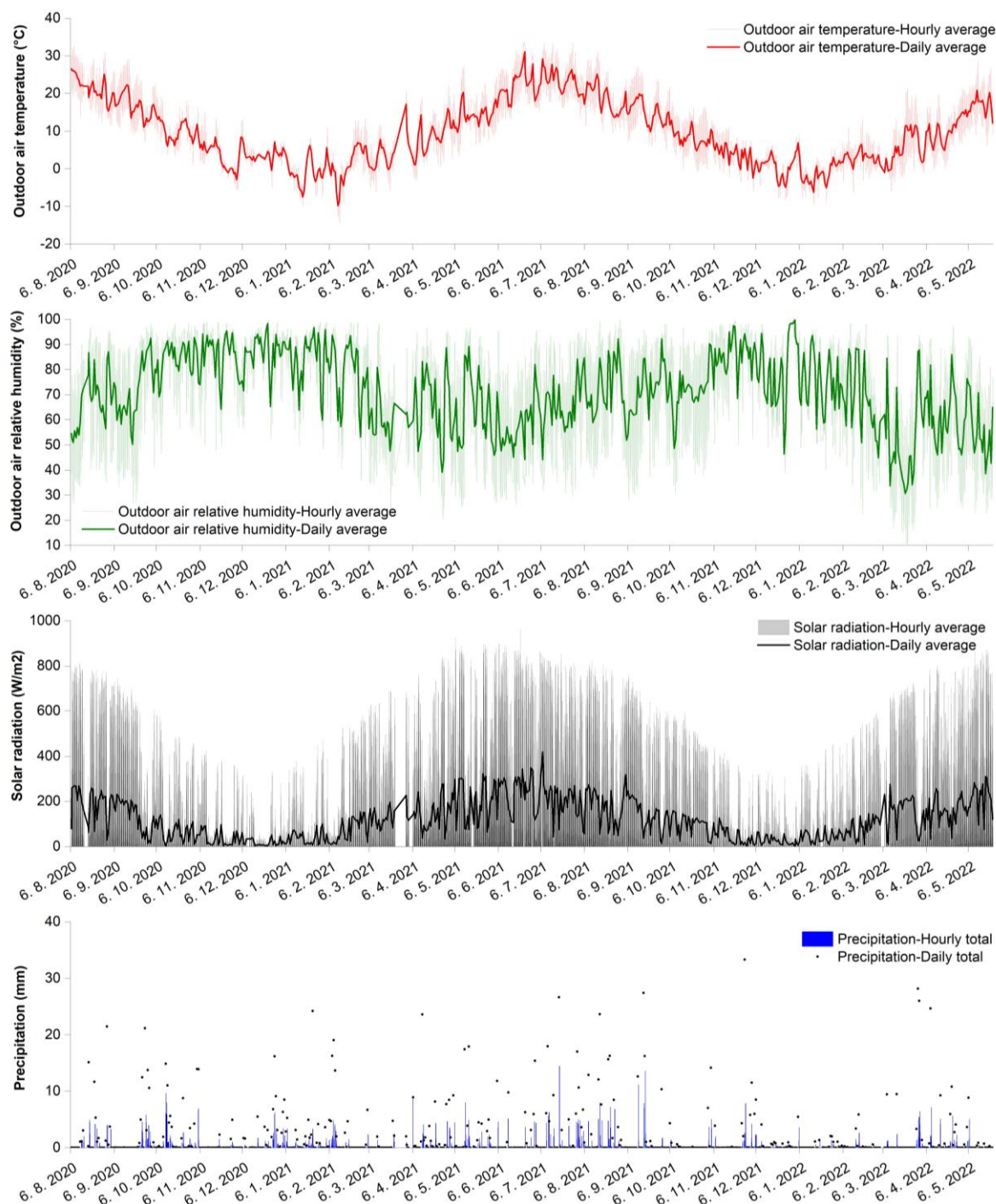
Rýchlosť vetra	Relatívna vlhkosť vzduchu
Metóda merania ultrazvuková Rozsah merania 0 až 75 m/s Rozlíšenie 0,1 m/s Presnosť $\pm 0,3$ m/s alebo ± 3 % (0 až 35 m/s) ± 5 % (>35 m/s)	Metóda merania capacitive Rozsah merania 0 – 100 % RH Rozlíšenie 0,1 % RH Presnosť senzora ± 2 % RH
Smer vetra	Atmosférický tlak
Metóda merania ultrazvuková Rozsah merania 0 až 359,9° Rozlíšenie 0,1° Presnosť $< 3^\circ$ (>1 m/s)	Metóda merania MEMS senzor, capacitive Rozsah merania 300 – 1200 hPa Rozlíšenie 0,1 hPa Presnosť senzor ± 0.5 hPa (0 až +40 °C)
Zrážky (dážď)	Globálne žiarenie (pyranometer)
Metóda merania Radar senzor Rozsah merania: veľkosť kvapiek 0,3 až 5,0 mm Rozlíšenie (kvapalné zrážky) 0,01 mm Typy zrážok: dážď, sneh Reprodukovateľnosť typicky >90 %	Rozsah merania 0 až 1500W/m ² Rozlíšenie 0.1W/m ² Spektrálny rozsah 0,3 až 3 μ m
Teplota vzduchu	
Metóda merania NTC Rozsah merania -50 až +60 °C Rozlíšenie 0.1 K (-20 až +50 °C), inak 0.2 K Presnosť senzor ± 0.2 K (-20 až +50 °C), inak ± 0.5 K (>-30 °C)	

Takto navrhnutý systém umožnil realizovať dlhodobý monitoring vegetačných striech v podmienkach reálnej prevádzky a vytvoril jedinečný súbor údajov využiteľných pri hodnotení ich energetických, mikroklimatických a environmentálnych funkcií. Získané dáta predstavujú základ pre analýzu teplotného režimu, hustoty tepelného toku a energetického správania vegetačných strešných systémov prezentovaných v nasledujúcich kapitolách.

Rozdielny charakter jednotlivých zimných období predstavuje významnú výhodu experimentu, pretože umožňuje posúdiť správanie vegetačných striech nielen počas jednej konkrétnej sezóny, ale v širšom spektre klimatických podmienok. Získané údaje vytvárajú spoľahlivý základ pre hodnotenie teplotného režimu strešných konštrukcií, hustoty tepelného toku a energetických prínosov vegetačných systémov prezentovaných v nasledujúcich kapitolách.

4.6 Klimatické podmienky počas monitoringu

Experimentálne merania realizované v rámci projektu greenIZOLA prebiehali v klimatických podmienkach mesta Košice. Experimentálne strešné segmenty boli vybudované na administratívnej budove spoločnosti IZOLA Košice nachádzajúcej sa v južnej časti mesta v nadmorskej výške približne 208 m n. m. Lokalita patrí podľa klasifikácie Köppena-Geigera do klimatickej oblasti Dfb charakterizovanej teplým letom a chladnou zimou bez výrazného obdobia sucha (obr. 4.19).



Obr. 4.19 Klimatické podmienky monitorované na experimentálnom centre greenIZOLA počas sledovaného obdobia

Klimatické údaje boli získavané prostredníctvom automatickej meteorologickej stanice umiestnenej priamo v areáli experimentálneho centra greenIZOLA. Súčasťou meraní bolo kontinuálne zaznamenávanie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, atmosférických zrážok, rýchlosti a smeru vetra, ako aj intenzity krátkovlnného a dlhovlnného slnečného žiarenia. Súčasne boli monitorované vnútorné klimatické podmienky v priestoroch pod experimentálnymi strešnými segmentmi.

Pre potreby hodnotenia energetického správania vegetačných striech boli analyzované tri po sebe nasledujúce zimné obdobia v rokoch 2020 až 2023. Všetky tri zimy boli podľa hodnotenia

Slovenského hydrometeorologického ústavu teplotne nadnormálne. Priemerná teplota vzduchu dosiahla počas zimy 2020/2021 hodnotu 1,1 °C, počas zimy 2021/2022 hodnotu 0,8 °C a počas zimy 2022/2023 hodnotu 2,0 °C. V porovnaní s klimatickým normálom 1991–2020 to predstavovalo kladné odchýlky +1,9 K, +1,7 K a +2,9 K.

Významným znakom sledovaného obdobia bol obmedzený výskyt snehovej pokrývky. Teplé zimné počasie spôsobilo, že v nadmorských výškach do približne 400 m n. m. sa sneh vyskytoval len sporadicky a jeho hrúbka bola prevažne nízka až priemerná. Tento faktor je dôležitý najmä z pohľadu hodnotenia energetických prínosov vegetačných striech, pretože umožňuje sledovať ich tepelné správanie bez dominantného vplyvu snehovej vrstvy.

Najchladnejším mesiacom celého monitorovaného obdobia bol január 2022 s priemernou mesačnou teplotou vzduchu –1 °C. Najnižšia priemerná denná teplota bola zaznamenaná 12. februára 2021, keď dosiahla hodnotu –9,8 °C. Minimálna hodinová teplota vzduchu bola nameraná 13. februára 2021 o 6:00 hod. a dosiahla hodnotu –14,4 °C. Naopak, najteplejším mesiacom sledovaného obdobia bol október 2022 s priemernou mesačnou teplotou 11,2 °C.

Z hľadiska zrážkových pomerov sa jednotlivé roky výrazne odlišovali. Obdobia október 2020 až apríl 2021 a október 2022 až apríl 2023 vykazovali podobné úhrny atmosférických zrážok približne 416 mm a 411 mm. Naopak obdobie október 2021 až apríl 2022 bolo výrazne suchšie s celkovým úhrnom iba 190 mm. Najvyšší mesačný úhrn zrážok bol zaznamenaný v októbri 2020 a dosiahol 159 mm. Najvyšší denný úhrn predstavoval 91 mm zrážok nameraných 13. októbra 2020.

Najväčšia hrúbka snehovej pokrývky bola zaznamenaná v decembri 2022, keď dosiahla približne 170 mm. Súvislá snehová vrstva bola počas monitoringu pozorovaná len v obmedzenom rozsahu, pričom na všetkých experimentálnych segmentoch sa vytvorila napríklad v období od 10. do 14. februára 2021.

Počas celého experimentu bola vnútorná teplota v priestoroch pod monitorovanými strešnými segmentmi udržiavaná približne na úrovni 20 °C. Tým boli vytvorené stabilné podmienky umožňujúce objektívne porovnanie tepelnej odozvy jednotlivých strešných skladieb a hodnotenie ich energetického prínosu počas rôznych klimatických situácií.

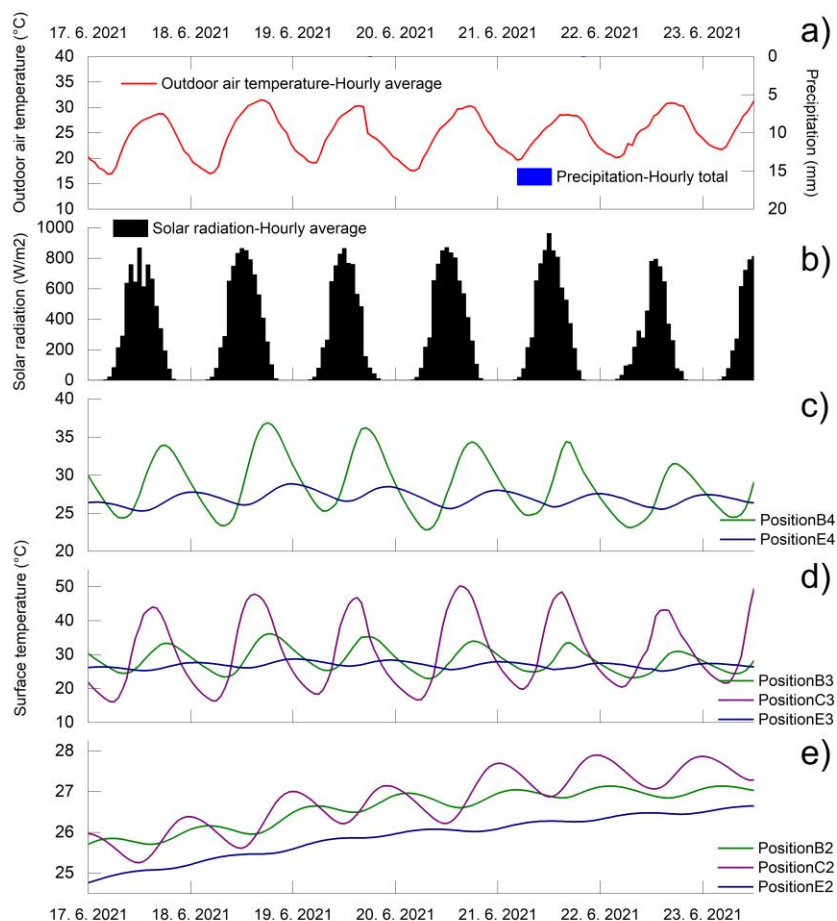
Rozdielny priebeh jednotlivých zimných období predstavuje významný prínos projektu greenIZOLA. Dlhodobý monitoring umožnil sledovať správanie vegetačných striech počas rokov s odlišnými teplotnými a zrážkovými charakteristikami, čo vytvára kvalitný podklad pre hodnotenie ich energetického potenciálu v podmienkach stredoeurópskeho podnebia. Získané údaje zároveň poskytujú cenné informácie pre navrhovanie obnovy existujúcich budov s využitím prvkov modrej a zelenej infraštruktúry.

4.7 Tepelná odozva vegetačných striech v kontexte klimatických parametrov

Priebehy povrchových teplôt v experimentálnych strechách počas štyroch charakteristických období roku 2021 sú zobrazené na obr. 4.20 až obr. 4.23. Vonkajšie klimatické parametre sú charakterizované teplotou vonkajšieho vzduchu, atmosférickými zrážkami – v grafoch na obr. 4.20 až obr. 4.23 zobrazené písmenom a) – a intenzitou slnečného žiarenia – na obr. 4.20 až obr. 4.23 zobrazené písmenom b). Povrchové teploty θ_s merané na pozíciách 2 (B2), 3 (C3) a 4 (E4) v experimentálnych segmentoch S1, S2 a S3 sú zobrazené v častiach c), d) a e) na obr. 4.20 až obr. 4.23.

4.7.1 Letné obdobie bez dažďa (17. – 23. jún 2021)

Celkovo bolo analyzovaných šesť letných, teplých a slnečných dní v období od 17. júna 2021 do 23. júna 2021 (spolu 157 hodín). Počas tohto obdobia nebol zaznamenaný žiadny atmosférický zrážkový úhrn, priemerná teplota vzduchu ($\theta_{e,average}$) dosiahla 24,6 °C, minimálna nameraná teplota ($\theta_{e,min}$) bola 16,9 °C a maximálna teplota ($\theta_{e,max}$) 31,5 °C. Pribeh klimatických parametrov je zobrazený na obr. 4.20 a), b).



Obr. 4.20 Merané klimatické parametre: teplota vonkajšieho vzduchu, atmosférické zrážky a globálne slnečné žiarenie pre analyzované obdobie 17. júna 2021 – 23. júna 2021 sú zobrazené v častiach a), b). Pribeh povrchových teplôt meraných v experimentálnych strechách na pozíciách 4, 3 a 2 je graficky znázornený v častiach c), d) a e).

Povrchová teplota pod nižšou hrúbkou strešného substrátu (120 mm) na pozícii 4 (obr. 4.20 c) je výrazne vyššia v porovnaní s povrchovou teplotou pri konštrukcii s vyššou hrúbkou substrátu (240 mm). Rozdiel medzi maximami teplôt meraných pod vrstvami substrátu s hrúbkami 120 mm a 240 mm presahuje 7 °C. Jasne pozorovateľný je aj fázový posun teplotného maxima, ktorý je spôsobený vyššou tepelnou kapacitou vegetačnej vrstvy. Posun maximálnej teploty pod vrstvou substrátu s hrúbkou 120 mm oproti maximálnej teplote vonkajšieho vzduchu je približne 1,5 hodiny. V prípade hrúbky substrátu 240 mm je tento posun 7 hodín.

Podobné priebehy povrchových teplôt boli zaznamenané aj na hydroizolačnej vrstve, pozícia 3 (obr. 4.20 d); tab. 4.2). Na tejto pozícii je možné analyzovať teplotný vplyv (účinnosť) skladby vegetačnej strechy a porovnať ho s referenčným variantom štrkového strešného povrchu.

Počas horúceho dňa s vysokou intenzitou slnečného žiarenia dochádza k výraznému zvýšeniu teploty pod štrkovou vrstvou (pozícia C3). Povrchová teplota na tomto mieste v letných mesiacoch mnoho ráz presahuje 50 °C. Aplikácia vegetačnej vrstvy redukuje tento teplotný extrém o 14 °C pri hrúbke substrátu 120 mm a až o 21 °C pri hrúbke substrátu 240 mm. Rozdiel medzi minimálnou ($\theta_{s,min}$) a maximálnou ($\theta_{s,max}$) povrchovou teplotou pod štrkovou vrstvou bol 34,2 °C. V prípade vegetačných striech s hrúbkou 120 mm a 240 mm sa tento rozdiel znížil na 13,2 °C, resp. 3,6 °C.

Horúce obdobie bez zrážok sa prejavilo aj pod masívnou vrstvou tepelnej izolácie (obr. 4.20 e). Z priebehu teplôt na pozícii 2 je možné pozorovať kontinuálny nárast povrchovej teploty vo všetkých experimentálnych segmentoch. Najpomalšie sa prehrievala skladba strechy so substrátom hrubým 240 mm. Najprudší nárast povrchových teplôt s výraznou teplotnou amplitúdou bol pozorovaný pri referenčnom segmente strechy so štrkovou vrstvou.

Tab. 4.2 Charakteristiky povrchových teplôt nameraných v experimentálnych strechách počas letného horúceho a suchého obdobia (17. jún 2021 – 23. jún 2021)

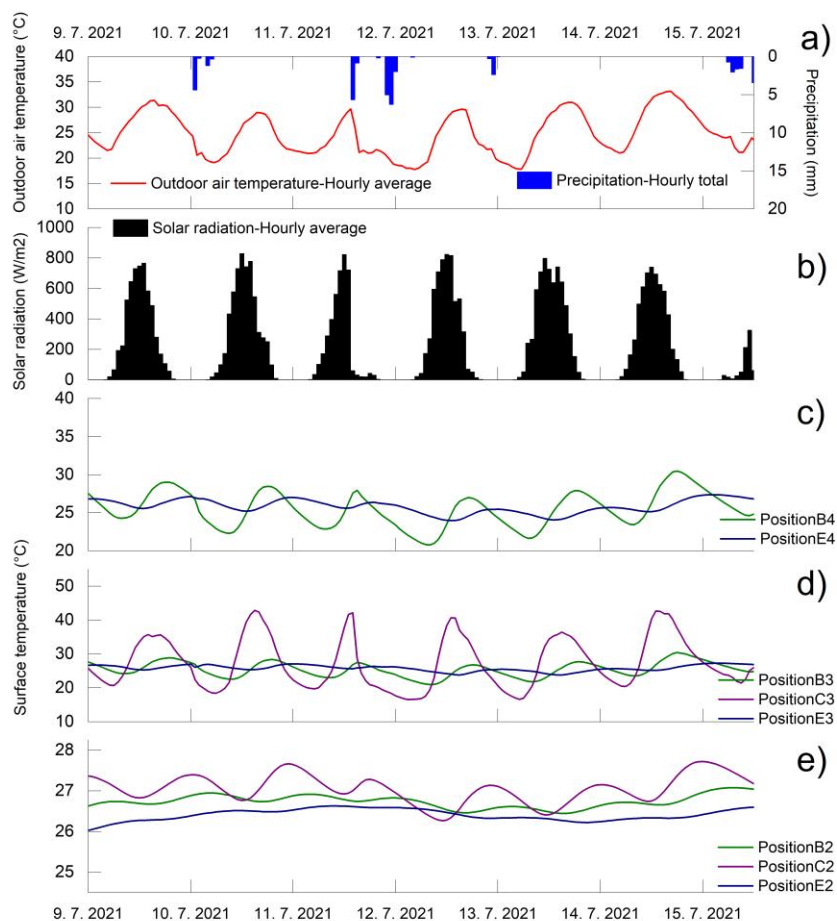
Pozícia senzora	Úhrn zrážok (mm)	$\theta_{e,min}$ (°C)	$\theta_{e,max}$ (°C)	$\theta_{e,av.}$ (°C)	$\theta_{s,min}$ (°C)	$\theta_{s,max}$ (°C)	$\theta_{s,av.}$ (°C)	$\Delta\theta_s$ (°C)
Exteriér	0	16,9	31,5	24,6				14,6
B3	157				22,9	36,1	28,5	13,2
C3	157				16,1	50,3	30,7	34,2
E3	157				25,2	28,8	26,9	3,6

4.7.2 Letné daždivé obdobie (9. – 15. júl 2021)

Druhé analyzované letné obdobie predstavuje časovú periódu od 9. júla do 15. júla 2021 (157 hodín). Perióda sa vyznačuje podobnými teplotami vzduchu ($\theta_{e,average} = 24,7$ °C, $\theta_{e,min} = 17,8$ °C a $\theta_{e,max} = 33,2$ °C) ako predchádzajúce obdobie. Priebehy vonkajších klimatických parametrov sú znázornené na obr. 4.21 a), b). Na rozdiel od predchádzajúceho obdobia boli počas tohto intervalu zaznamenané typické letné daždivé večery. Súhrnný úhrn zrážok počas šiestich dní dosiahol 38 mm. Dažďová voda prirodzene ochladzuje segmenty experimentálnych striech (obr. 4.21 c). Vrstvy substrátu akumulujú zrážkovú vodu. Rozdiel medzi maximálnymi teplotami meranými pod vrstvami substrátu (pozícia 4) s hrúbkami 120 mm a 240 mm predstavuje 3 °C.

Vplyv atmosférických zrážok na priebeh povrchových teplôt sa prejavil aj na hydroizolačnej vrstve (pozícia 3) (obr. 4.21 d); tab. 4.3).

Voda, ktorá sa nachádza vo vrstvách experimentálnych segmentov, sa podieľa na znižovaní povrchových teplôt jednotlivých častí strešného plášťa. Povrchová teplota referenčného segmentu so štrkovou vrstvou nepresiahla 43 °C. Rozdiel medzi $\theta_{s,min}$ a $\theta_{s,max}$ pod štrkovou vrstvou dosiahol 26,3 °C. Zatiaľ čo pri streche so substrátom hrúbky 240 mm je vplyv vody minimálny, pri streche so substrátom hrubým 120 mm sa výrazne prejavuje zníženie povrchových teplôt v jednotlivých vrstvách. Daždivé obdobie zmiernilo nárast teplôt vo všetkých experimentálnych segmentoch. Tento fakt sa prejavil aj pod vrstvou tepelnej izolácie na pozícii 2 (obr. 4.21 e). Podobne ako počas obdobia bez zrážok, najnižšia povrchová teplota bola nameraná v strešnom plášti so substrátom hrubým 240 mm.



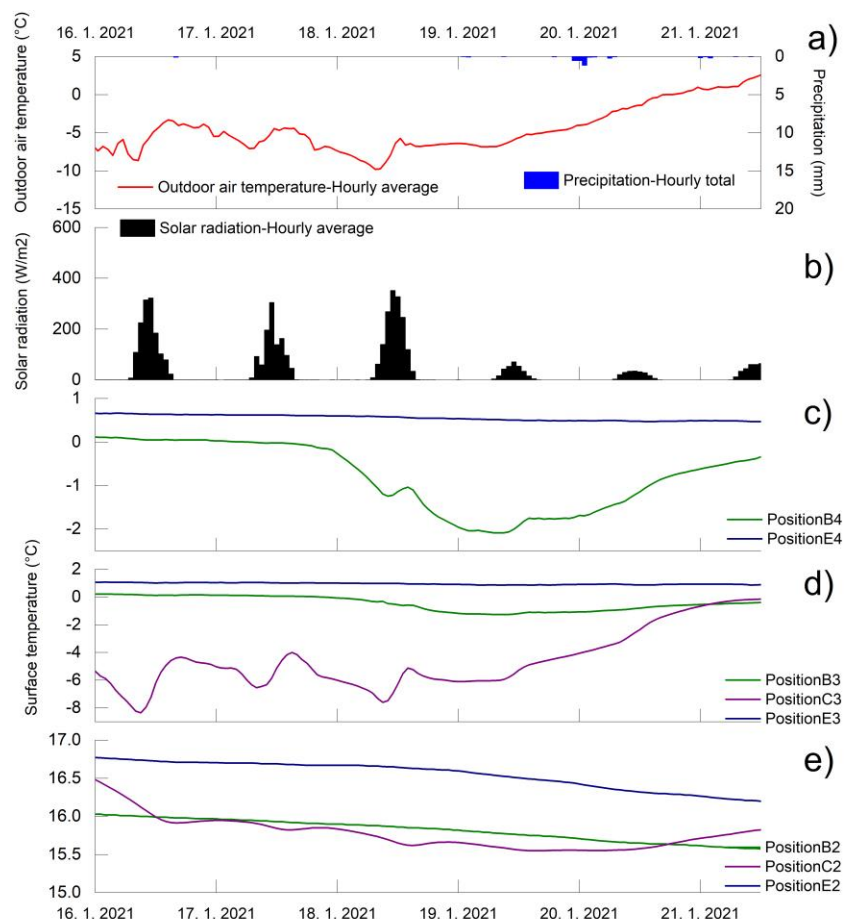
Obr. 4.21 Merané klimatické parametre: teplota vonkajšieho vzduchu, atmosférické zrážky a globálne slnečné žiarenie pre analyzované obdobie 9. júla 2021 – 15. júla 2021 sú zobrazené v častiach a), b). Pribeh povrchových teplôt meraných v experimentálnych strechách na pozíciách 4, 3 a 2 je graficky znázornený v častiach c), d) a e).

Tab. 4.3 Charakteristiky povrchových teplôt nameraných v experimentálnych strechách počas letného horúceho a daždivého obdobia (9. júl 2021 – 15. júl 2021)

Pozícia senzora	Úhrn zrážok (mm)	$\theta_{e,min}$ (°C)	$\theta_{e,max}$ (°C)	$\theta_{e,av.}$ (°C)	$\theta_{s,min}$ (°C)	$\theta_{s,max}$ (°C)	$\theta_{s,av.}$ (°C)	$\Delta\theta_s$ (°C)
Exteriér	38	17,8	33,2	24,7				19,2
B3					21,0	30,4	25,5	9,4
C3					16,6	42,9	27,3	26,3
E3					23,8	27,3	25,8	3,5

4.7.3 Zimné obdobie (16. – 21. január 2021)

Na analýzu povrchových teplôt v zimnom období bol zvolený interval od 16. januára 2021 do 21. januára 2021 (132 hodín). Toto obdobie reprezentuje chladné počasie s charakteristikami vonkajšej teploty vzduchu ($\theta_{e,average} = -4,6$ °C, $\theta_{e,min} = -9,8$ °C a $\theta_{e,max} = 2,5$ °C) bez atmosférických zrážok (obr. 4.22 a), b).



Obr. 4.22 Merané klimatické parametre: teplota vonkajšieho vzduchu, atmosférické zrážky a globálne slnečné žiarenie pre analyzované obdobie 16. januára 2021 – 21. januára 2021 sú zobrazované v častiach a), b). Priebeh povrchových teplôt meraných v experimentálnych strechách na pozíciách 4, 3 a 2 je graficky znázornený v častiach c), d) a e).

Počas mrazivých dní bez snehovej pokrývky eliminuje substrátová vrstva prenikanie mrazu do strešnej konštrukcie (obr. 4.22 c). Nočná teplota vzduchu klesajúca pod -9°C sa prejavuje na povrchovej teplote pod substrátovými vrstvami na pozícii 4. Počas najchladnejších hodín analyzovaného obdobia klesla povrchová teplota pod substrátom s hrúbkou 120 mm na $-1,3^{\circ}\text{C}$. Teplotné výkyvy pod substrátom s hrúbkou 240 mm neprekročili $0,2^{\circ}\text{C}$.

Tab. 4.4 Charakteristiky povrchových teplôt nameraných v experimentálnych strechách počas zimného chladného a suchého obdobia (16. január – 21. január 2021)

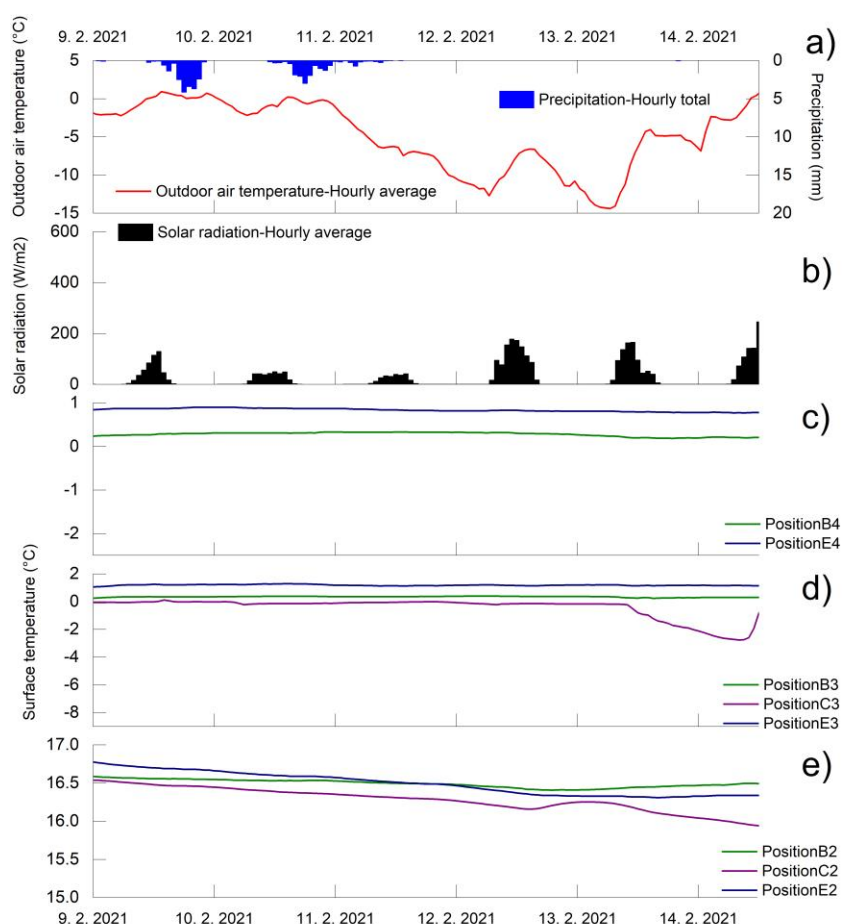
Pozícia senzora	Úhrn zrážok (mm)	$\theta_{e,min}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\theta_{e,max}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\theta_{e,av.}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\theta_{s,min}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\theta_{s,max}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\theta_{s,av.}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\theta_s$ ($^{\circ}\text{C}$)
Exteriér	3	-9,8	2,5	-4,6				12,3
B3					-1,3	0,2	-0,5	1,5
C3					-8,3	-0,1	-4,6	8,2
E3					0,9	1,1	1,0	0,2

4.7.4 Zimné obdobie so snehovou pokrývkou (9. – 14. február 2021)

Pre klimatický región Košíc je obdobie na prelome januára a februára charakteristické chladným počasím s postupným nárastom atmosférických zrážok pri nízkych teplotách so

snehom. Takéto počasie dobre charakterizuje interval od 9. februára 2021 do 14. februára 2021 (132 hodín). Dňa 9. februára 2021 prinieslo postupné ochladzovanie so zamračenou oblohou večerné sneženie. Celodenné mrazivé počasie zabezpečilo udržanie snehovej pokrývky a zároveň vytvorilo podmienky na jej nárast. Počas analyzovaného obdobia od 9. februára 2021 do 14. februára 2021 bola na experimentálnych strešných segmentoch súvislá snehová pokrývky. Prvá polovica analyzovaného obdobia bola charakteristická teplotami vzduchu okolo 0 °C a snežením. Výška snehovej pokrývky dosiahla 11. februára večer 42 mm. Vplyv snehovej pokrývky na priebeh povrchových teplôt na pozícii 4 je znázornený na obr. 4.23 c). Merané povrchové teploty pod substrátovými vrstvami s hrúbkou 120 mm a 240 mm sa pohybovali v rozmedzí 0 až 1 °C bez ohľadu na vonkajšiu teplotu vzduchu.

Povrchové teploty merané na hydroizolačnej vrstve (pozícia 3) sú znázornené na obr. 4.23 d) a zhrnuté v tab. 4.5. Vplyv vrstvy snehovej pokrývky zmierňuje povrchové teploty pod substrátovými aj štrkovými vrstvami.



Obr. 4.23 Merané klimatické parametre: teplota vonkajšieho vzduchu, atmosférické zrážky a globálne slnečné žiarenie pre analyzované obdobie 9. februára 2021 – 14. februára 2021 sú zobrazené v častiach a), b). Priebeh povrchových teplôt meraných v experimentálnych strechách na pozíciách 4, 3 a 2 je graficky znázornený v častiach c), d) a e).

Napriek ochladeniu 11. februára večer oscilovala povrchová teplota pod štrkovou vrstvou okolo 0 °C. Ani ochladenie na -10 °C sa neprejavilo poklesom povrchovej teploty pod štrkovou vrstvou. Niekoľko dní trvajúce mrazivé počasie s teplotami vzduchu pod -14 °C a nízkou intenzitou slnečného žiarenia spôsobilo pokles povrchovej teploty pod štrkovou vrstvou na -

2,8 °C. Počas analyzovaného obdobia, napriek nízkym teplotám vzduchu, nedošlo k výraznému poklesu povrchových teplôt pod oboma substrátmi vegetačných striech.

Prítomnosť súvislej vrstvy snehu počas analyzovaného obdobia sa prejavila aj na priebehu povrchových teplôt pod tepelnou izoláciou (pozícia 2). Namerané povrchové teploty skúmaných segmentov vykazujú iba minimálne rozdiely (obr. 4.23 e).

Tab. 4.5 Charakteristiky povrchových teplôt nameraných v experimentálnych strechách počas zimného chladného a zasneženého obdobia (9. február – 14. február 2021)

Pozícia senzora	Úhrn zrážok (mm)	$\theta_{e,min}$ (°C)	$\theta_{e,max}$ (°C)	$\theta_{e,av.}$ (°C)	$\theta_{s,min}$ (°C)	$\theta_{s,max}$ (°C)	$\theta_{s,av.}$ (°C)	$\Delta\theta_s$ (°C)
Exteriér	35	-14,4	1,0	-5,0				19,4
B3					0,2	0,4	0,4	0,2
C3					-2,8	0,1	-0,4	2,9
E3					1,1	1,3	1,2	0,2

4.7.5 Zhrnutie

Analýza experimentálnych segmentov strešných plášťov v Košiciach ukázala jednoznačný prínos vegetačných striech pre tepelný režim budovy v lete aj v zime. Výsledky meraní v priebehu roka 2021 ukazujú, že vegetačné strechy významne redukovujú teplotné extrémny, stabilizujú povrchové teploty strešných konštrukcií, znižujú riziko prehrievania v lete a chránia strechy pred nadmerným premrzaním v zime.

V letnom období vegetačná vrstva významne redukuje prehrievanie strešného plášťa. Zaznamenané povrchové teploty na hydroizolačnej vrstve boli pri substráte hrubom 120 mm nižšie o približne 14 °C a pri hrúbke 240 mm až o 21 °C v porovnaní s referenčnou štrkovou vrstvou. Hrubší substrát (240 mm) vykázal aj výrazný fázový posun maxima povrchovej teploty (približne 7 hodín), čím dochádza k oneskoreniu prieniku teplotného impulzu do konštrukcie. Daždivé obdobia navyše prinášajú dodatočné ochladenie v dôsledku akumulácie vody a evapotranspirácie, ktorá je súhrnným procesom odparovania vody z povrchu (evaporácia) a transpirácie rastlín.

V zimnom období substrátová vrstva zmierňuje prenikanie mrazu do strechy a stabilizuje teplotný režim. Počas chladných dní bez snehu povrchová teplota pod vegetačnou vrstvou oscilovala okolo 0 °C, zatiaľ čo pod štrkovou vrstvou klesala až k -8 °C. Pri súvislej snehovej pokrývke sa ukázal synergický efekt snehu a vegetačného substrátu: povrchové teploty zostali stabilné medzi 0 – 1 °C, čo poskytovalo dodatočnú ochranu pred nízkymi teplotami vzduchu (do -14 °C).

Rozdiel v amplitúdach teploty $\Delta\theta_s$ bol v prípade referenčného segmentu so štrkom v lete až 34 °C, kým pri vegetačných strechách sa znížil na 12 °C (substrát 120 mm) a len 3 – 4 °C (substrát 240 mm). V zime sa amplitúda pri štrkovom segmente pohybovala okolo 8 °C, zatiaľ čo pri vegetačných strechách zostala prakticky zanedbateľná (< 0,5 °C). Tieto výsledky potvrdzujú, že vegetačné strechy významne prispievajú k redukcii teplotných fluktuácií v stavebných konštrukciách.

Po dvoch rokoch prevádzky možno konštatovať, že vegetácia na všetkých testovaných a realizovaných konštrukciách dokáže prežiť a prosperovať v klimatických podmienkach vybranej lokality bez dodatočnej externej závlahy. Vegetácia významne lepšie prosperuje na

streche s hrubšou vrstvou substrátu. Je to spôsobené lepšími možnosťami pre vývoj koreňového systému jednotlivých rastlín a vyššou retenčnou kapacitou hrubšej substrátovej vrstvy.

Zmierňovanie odtoku vody z vegetačných striech je regulované predovšetkým substrátovou vrstvou a retenčným prvkom strechy. Dodatočnú akumuláciu vody zabezpečuje ochranná a filtračná membrána. Podľa údajov výrobcu použitých strešných komponentov je možné dosiahnuť odtokový súčiniteľ až 0,1 pri hrúbke substrátu 120 mm. Použitím väčšej hrúbky substrátu (napríklad 240 mm) je možné znížiť hodnotu odtokového súčiniteľa na číslo menšie než 0,1. Odtokový súčiniteľ v tomto kontexte je definovaný ako bezrozmerný parameter, ktorý udáva, aká časť zrážkovej vody odtečie zo strechy a aká časť sa zadrží, vsakuje alebo odparí.

Aplikácia prvkov špongiového mesta prinesie:

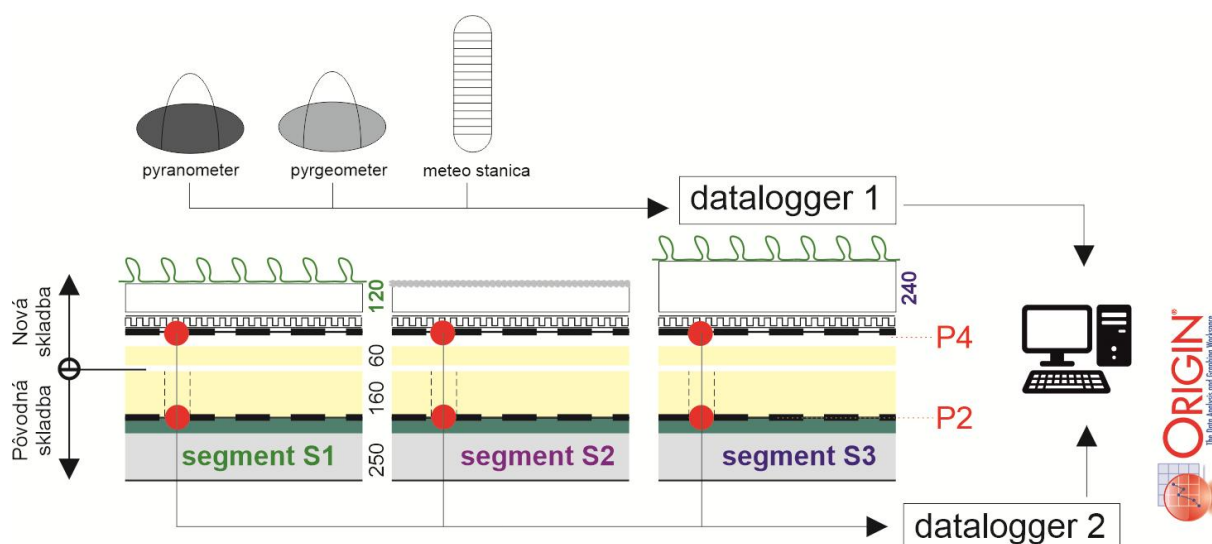
- výrazné odľahčenie dažďovej kanalizácie počas prívalových a dlhodobých dažďov,
- zadržiavanie maximálneho možného množstva zrážkovej vody v strešnom plášti,
- sekundárne dlhšie trvajúce obdobie evapotranspirácie, počas ktorého sa zmierňuje efekt mestských tepelných ostrovov,
- zachytenie podstatného množstva dažďovej vody pre rozvoj vegetácie.

Realizáciou všetkých fáz sa podiel vegetačných striech a terás na experimentálnej budove zvýši na 82 %. Zároveň sa aplikované prvky špongiového mesta stanú experimentálnymi konštrukciami pre práce univerzitných študentov a mladých výskumníkov.

4.8 Medziročné porovnanie tepelnej odozvy vegetačných striech v zimnom období

Dlhodobé monitorovanie povrchovej teploty na rozhraní hydroizolačnej membrány a substrátovej vrstvy v experimentálnych strešných segmentoch predstavuje kľúčový nástroj na kvantifikáciu vplyvu vegetačných vrstiev na teplotné pole strešného plášťa. Presne definované umiestnenie teplotného senzora typu Pt100, dané konštrukčnou skladbou strechy, zaručuje reprodukovateľnosť meraní a umožňuje relevantné porovnania medzi vegetačnými segmentmi S1, S3 a referenčným štrkovým segmentom S2 bez vegetácie (obr. 4.24).

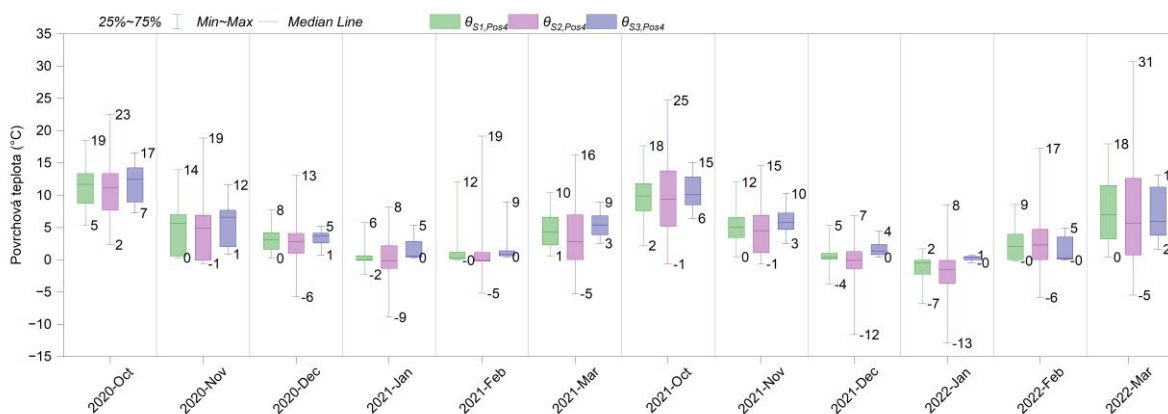
Zaznamenané povrchové teploty v rámci rozličných klimatických charakteristík poskytujú ucelený obraz o dynamike tepelného správania vegetačných striech. Tieto údaje predstavujú fundamentálny vstup pre vývoj a kalibráciu numerických modelov prenosu tepla, vzduchu a vody (HAM – Heat, Air, Moisture), ktoré budú v budúcnosti slúžiť ako nástroj pri návrhu a optimalizácii vegetačných striech v rôznych klimatických kontextoch.



Obr. 4.24 Schematické zobrazenie experimentálnych segmentov, prepojenie na meraciu infraštruktúru a pozícia senzora na meranie povrchovej teploty hydroizolačnej vrstvy (P4)

Povrchové teploty zaznamenané na hydroizolačnej membráne experimentálnych strešných segmentov S1, S2 a S3 sú znázornené po mesiacoch formou krabicového grafu (boxplot) na obr. 4.25. Krabice sú definované kvartilmi Q1 (25 %) a Q3 (75 %) a mediánom (50 %). „Fúzy“ (whiskers) zobrazujú mesačné minimá a maximá povrchových teplôt nameraných na membráne.

Jednoznačný vplyv vegetačnej vrstvy na tlmenie výkyvov povrchovej teploty membrány bol pozorovaný počas celého analyzovaného obdobia. Ako sa dalo očakávať, najnižšie aj najvyššie hodnoty povrchovej teploty boli zaznamenané v referenčnom štrkovom segmente S2 ($\theta_{S2min} = -13\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta_{S2max} = 31\text{ }^{\circ}\text{C}$). V segmente S1 s 120 mm hrubým substrátom boli tieto extrémne výrazne tlmené ($\theta_{S1min} = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta_{S1max} = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$). V prípade segmentu S3 s hrúbkou substrátu 240 mm teplota membrány počas troch zím prakticky neklesla pod bod mrazu ($\theta_{S3min} = -0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta_{S3max} = 17\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Obr. 4.25 Boxplot hodinových povrchových teplôt membrány pre každý analyzovaný mesiac počas zím 2020 – 2022

V januári 2022, ktorý bol najchladnejším mesiacom počas realizovaných meraní, s priemernou dennou teplotou vzduchu -1°C , boli zaznamenané nasledujúce rozsahy povrchových teplôt membrány:

- vegetačný segment S1 (substrát 120 mm) od -7°C do $+2^{\circ}\text{C}$;
- referenčný, štrkový segment S2 od -13°C do $+8^{\circ}\text{C}$;
- vegetačný segment S3 (substrát 240 mm) od 0°C do $+1^{\circ}\text{C}$.

Počas zimných mesiacov (december, január, február) kolísala povrchová teplota membrány v intervaloch:

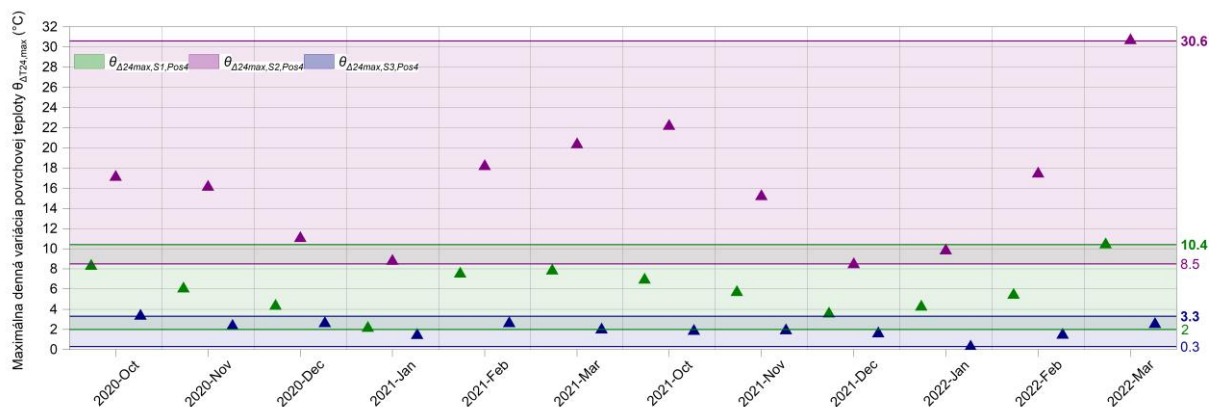
- vegetačný segment S1 (substrát 120 mm) od -7°C do $+12^{\circ}\text{C}$;
- referenčný, štrkový segment S2 od -13°C do $+19^{\circ}\text{C}$;
- vegetačný segment S3 (substrát 240 mm) od 0°C do $+9^{\circ}\text{C}$.

Najnižšie povrchové teploty na membráne vo všetkých experimentálnych segmentoch boli namerané v januári 2022.

Denná variácia povrchovej teploty ($\theta_{\Delta T24}$) je definovaná ako rozdiel medzi denným maximom a minimom povrchovej teploty nameranej na hydroizolačnej vrstve segmentov S1, S2 a S3 (obr. 4.26). Najvyššia denná variácia povrchovej teploty ($\theta_{\Delta T24,\text{max}}$) bola určená ako maximálny denný rozdiel medzi minimom a maximom povrchovej teploty zaznamenaný počas daného mesiaca. Tento údaj reprezentuje najextrémnejšiu amplitúdu dennej povrchovej teploty na hydroizolačnej vrstve počas jednotlivých mesiacov trvania experimentu. Najvyššie denné variácie povrchovej teploty ($\theta_{\Delta T24,\text{max}}$) na hydroizolačnej vrstve pre všetky tri experimentálne segmenty sú zobrazené na obr. 4.26.

Najvyššie denné kolísania povrchovej teploty membrány počas dvoch zimných sezón sa pohybovali v nasledujúcich rozsahoch:

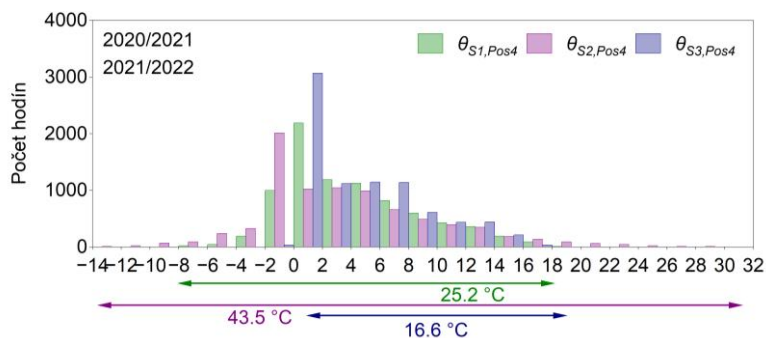
- vegetačný segment S1 (substrát 120 mm) od $2,0$ do $10,4^{\circ}\text{C}$;
- referenčný, štrkový segment S2 od $8,5$ do $30,6^{\circ}\text{C}$;
- vegetačný segment S3 (substrát 240 mm) od $0,3$ do $3,3^{\circ}\text{C}$.



Obr. 4.26 Najvyššie denné rozdiely povrchovej teploty $\theta_{\Delta T24,max}$ počas zím 2020 – 2022

Rozdelenie povrchových teplôt strešnej membrány v experimentálnych skladbách (S1, S2, S3) je znázornené pomocou histogramu (obr. 4.27). V prípade referenčnej štrkovej strechy (S2) boli povrchové teploty membrány pod 0 °C zaznamenané od polovice októbra do konca marca v celkovom trvaní 2753 h (1361 h, 2020/2021 a 1392 h, 2021/2022), čo predstavovalo približne 33 % z celého obdobia monitorovania (október 2020 – marec 2022). Zamrzanie substrátu až po membránu bolo pozorované iba počas zimných mesiacov december – február. Na extenzívnej vegetačnej streche s vrstvou substrátu hrúbky 120 mm (S1) boli povrchové teploty membrány pod 0 °C zaznamenané počas 1247 h (455 h, 2020/2021 a 792 h, 2021/2022), čo predstavovalo približne 15 % z celkovej dĺžky experimentu.

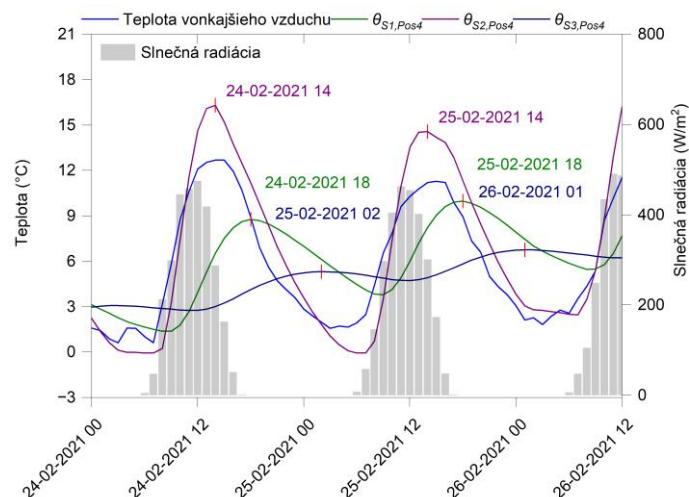
Na semiintenzívnej vegetačnej streche s hrúbkou substrátu 240 mm (S3) bolo teplotné namáhanie vplyvom prítomnosti substrátu a vegetácie výrazne utlmené. Povrchové teploty membrány pod 0 °C (nie nižšie než -0,5 °C) boli zaznamenané iba počas 67 h, a to výlučne na konci januára 2022.



Obr. 4.27 Histogram hodinových povrchových teplôt membrány v referenčnej štrkovej skladbe (S2) a v skladbách vegetačných segmentov (S1 a S3)

Vegetačné vrstvy ovplyvňujú tepelnú zotrvačnosť celej skladby strechy. Tento jav sa prejavuje posunom amplitúdy povrchovej teploty hydroizolačnej vrstvy.

Počas dvoch slnečných zimných dní bol tento posun zaznamenaný v oboch vegetačných segmentoch (S1 a S3) v porovnaní s referenčným segmentom S2 (obr. 4.28). V prípade segmentu S1 s hrúbkou substrátu 120 mm nastal posun teplotného maxima o približne 4 hodiny oproti segmentu S2. Pri segmente S3 s hrúbkou substrátu 240 mm bol tento posun až 11 hodín v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou (S2).



Obr. 4.28 Povrchové teploty membrány v segmentoch S1, S2 a S3 a ich vzájomné časové posuny počas slnečných zimných dní.

Výsledky dlhodobého monitoringu potvrdzujú výrazný vplyv vegetačnej vrstvy na tlmenie výkyvov povrchovej teploty strešnej membrány v zimnom období. Najvyššie denné variácie povrchovej teploty ($\theta_{\Delta T_{24,max}}$) dosahovali v referenčnom segmente S2 hodnoty až do 30,6 °C, zatiaľ čo pri strechách so substrátom boli tieto výkyvy výrazne nižšie – v prípade segmentu S3 s 240 mm hrubým substrátom len do 3,3 °C.

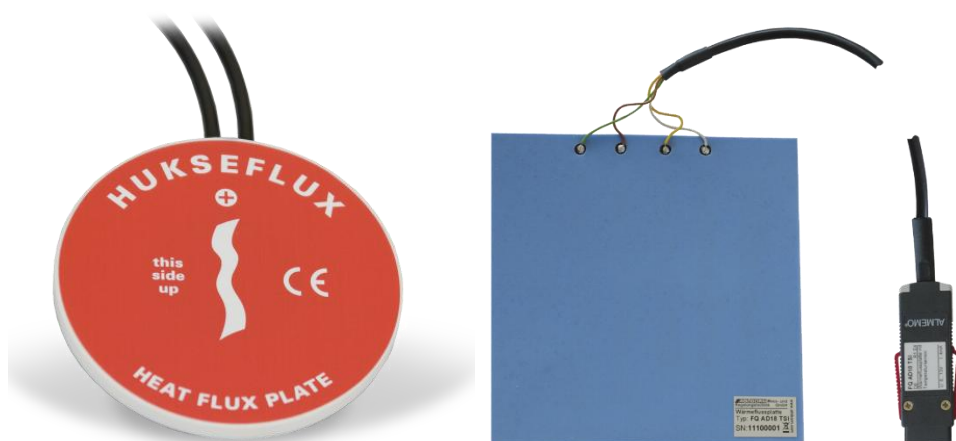
Okrem zmiernenia teplotných extrémov bol vplyv vegetačnej vrstvy pozorovaný aj v časovom posune teplotných maxim počas dňa – až o 11 hodín v prípade 240 mm hrubej vrstvy substrátu.

Tieto zistenia dokumentujú dôležitú regulačnú funkciu vegetačných striech v zimných podmienkach, a to nielen z hľadiska potenciálneho zníženia tepelných strát, ale aj z pohľadu ochrany hydroizolačnej vrstvy pred extrémnymi teplotnými zmenami. Výsledky je možné využiť pri návrhu striech s vyššou životnosťou, stabilnejšou energetickou bilanciou a lepšou pripravenosťou na klimatické výkyvy. Podrobná analýza povrchových teplôt na hydroizolačnej vrstve, určenie extrémov a zdôvodnenie ich výskytov v rámci sledovaného obdobia sa nachádza v štúdiu [1].

4.9 Analýza hustoty tepelného toku vegetačných striech

Meranie a vzájomné porovnávanie hustoty tepelného toku je v súčasnosti považované za štandardný prístup pri kvantifikácii energetickej odozvy stavebných konštrukcií, vegetačné strechy nevynímajúc. Priamo merané tepelné toky umožňujú zohľadniť dynamické javy (radiačnú bilanciu, akumuláciu a latentné teplo), ktoré exaktne opisujú reálne správanie stavebných konštrukcií v nestacionárnych klimatických podmienkach.

Tepelný tok predstavuje množstvo tepla, ktoré prechádza cez konštrukciu v čase. V prípade plochých striech sa spravidla hodnotí hustota tepelného toku $\dot{q}$ (W/m^2), teda teplo prechádzajúce cez jednotkovú plochu za jednotku času. V experimentálnom výskume sa tepelný tok meria priamo pomocou tenkých plošných snímačov – heat flux plates, ktoré sú vložené do definovanej roviny strešného plášt'a (obr. 4.29).



Obr. 4.29 Senzory na meranie hustoty tepelného toku

Na potreby energetickej bilancie sa okamžité hodnoty hustoty tepelného toku $\dot{q}$ (t) integrujú pre zvolené obdobie (deň, mesiac, sezóna). Denná bilancia (tepelný zisk/strata) použitá v tejto štúdii sa teda určí podľa vzťahu:

$$q_{24\text{ h}} = \int_0^{24\text{ h}} \dot{q}(t) dt \text{ (Wh/m}^2\text{)}$$

kde:

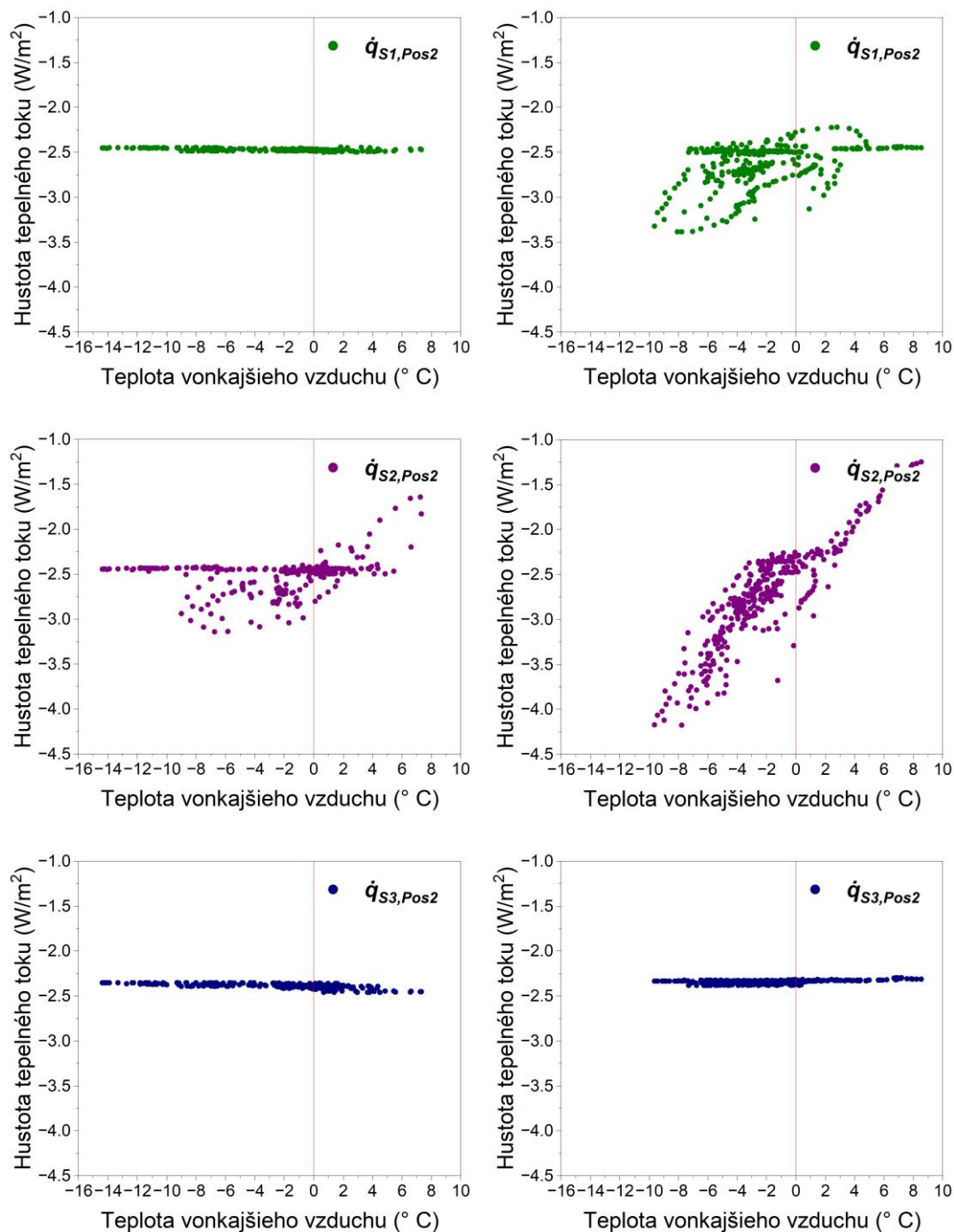
$\dot{q}$ (t) je okamžitá hodnota hustoty tepelného toku,

dt je časový krok merania.

Kladné hodnoty vyjadrujú tok smerom do interiéru (tepelný zisk), zatiaľ čo záporné hodnoty predstavujú tok smerom k vonkajšiemu povrchu (tepelná strata). V stavebno-fyzikálnej praxi sa výsledné denné či mesačné hodnoty porovnávajú medzi rôznymi strešnými skladbami. Takto sa kvantifikuje energetická účinnosť technického riešenia a schopnosť strešnej konštrukcie meniť tepelnú odozvu strechy v sledovaných kontextoch.

Podrobná analýza hustoty tepelného toku cez experimentálne segmenty počas troch po sebe idúcich zím sa nachádza v štúdii (1). V ďalšom texte sme sa zamerali na analýzu nameraných výsledkov za dve zimné periódy. TP1, perióda, počas ktorej bola na všetkých experimentálnych segmentoch nameraná prítomnosť súvislej snehovej vrstvy počas časti meranej periódy, a chladná perióda TP2 bez atmosférických zrážok a bez prítomnosti

snehovej vrstvy na experimentálnych segmentoch. Počas obdobia TP1 (8. – 23. február 2021) boli cez referenčný štrkový segment S2 namerané hodnoty hustoty tepelného toku v rozsahu od -3,2 do -1,7 W/m² (obr. 4.30, ľavý panel).



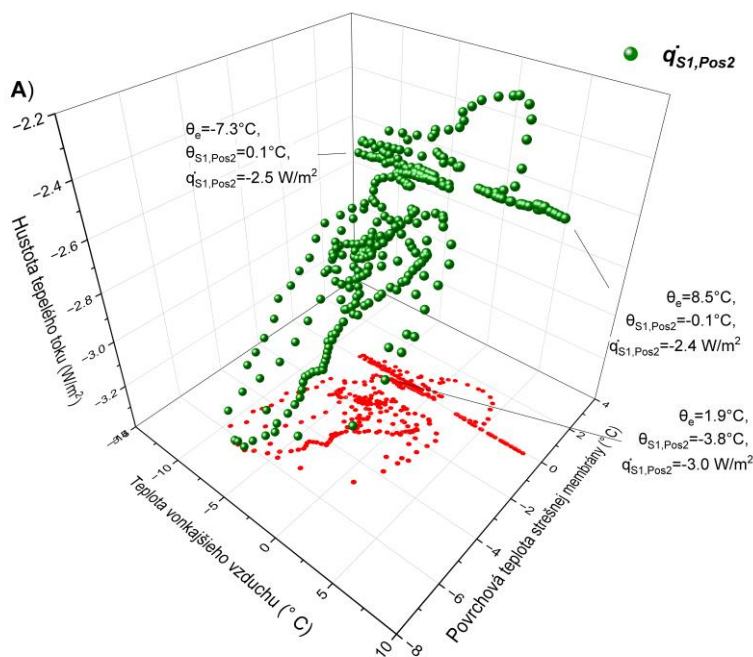
Obr. 4.30 Hodinové hodnoty hustoty tepelného toku namerané cez experimentálne segmenty S1 (zelená), S2 (fialová) a S3 (modrá) pre časovú periódu TP1 (8. – 23. 2. 2021) so snehovou pokrývkou (ľavý panel) a periódu TP2 (5. – 20. 1. 2022) bez snehu (pravý panel)

Vo všetkých troch segmentoch bola pri intenzívnych mrazoch pod -5 °C pozorovaná približne konštantná hodnota hustoty tepelného toku okolo -2,5 W/m², nezávislá od teploty vonkajšieho vzduchu. V prípade referenčného segmentu (S2) je možné tento jav pripísať dočasnej vrstve čerstvého snehu, ktorá pôsobila ako tepelná izolácia a znižovala tepelné straty. Po roztopení

snehovej vrstvy približne v polovici obdobia TP1 sa tepelný tok cez S2 opätovne zvýšil ($> -2.5 \text{ W/m}^2$). V období bez snehu absorboval segment S2 počas dňa viac krátkovlnného žiarenia než vegetačné strechy, čo krátkodobo znížilo jeho tepelné straty. V tomto krátkom období bola referenčná štrková strecha S2 energeticky najvýhodnejšia. Obe vegetačné strechy si počas celého TP1 udržiavali takmer konštantné hodnoty hustoty tepelného toku $\approx -2,5 \text{ W/m}^2$ (S1) a $\approx -2,4 \text{ W/m}^2$ (S3), bez ohľadu na vonkajšie klimatické podmienky (obr. 4.30, ľavý panel). V priebehu analyzovaného obdobia dochádzalo v substrátoch oboch vegetačných striech k prechodovým stavom vody medzi kvapalnou a tuhou fázou. Fázové premeny sú spravidla sprevádzané zmenami latentného tepla. Tento jav sa v kontexte teplôt substrátu v blízkosti strešnej membrány prejavoval osciláciami teploty okolo 0°C . V tomto období, bez ohľadu na prítomnosť snehovej vrstvy a jej hrúbku, sa cez oba experimentálne vegetačné segmenty realizovali takmer konštantné tepelné straty (obr. 4.30, ľavý panel). Hodnoty hustoty tepelného toku namerané v experimentálnych segmentoch počas chladného obdobia TP2 bez snehovej pokrývky (5. – 20. január 2022) sú zobrazené na obr. 4.30, pravý panel.

Vyššia variabilita hustoty tepelného toku bola zaznamenaná cez segmenty S1 ($-3,4$ až $-2,2 \text{ W/m}^2$) a S2 ($-4,2$ až $-1,25 \text{ W/m}^2$), zatiaľ čo cez segment S3 zostával tepelný tok stabilný ($\approx -2,4 \text{ W/m}^2$) bez ohľadu na vonkajšie klimatické parametre.

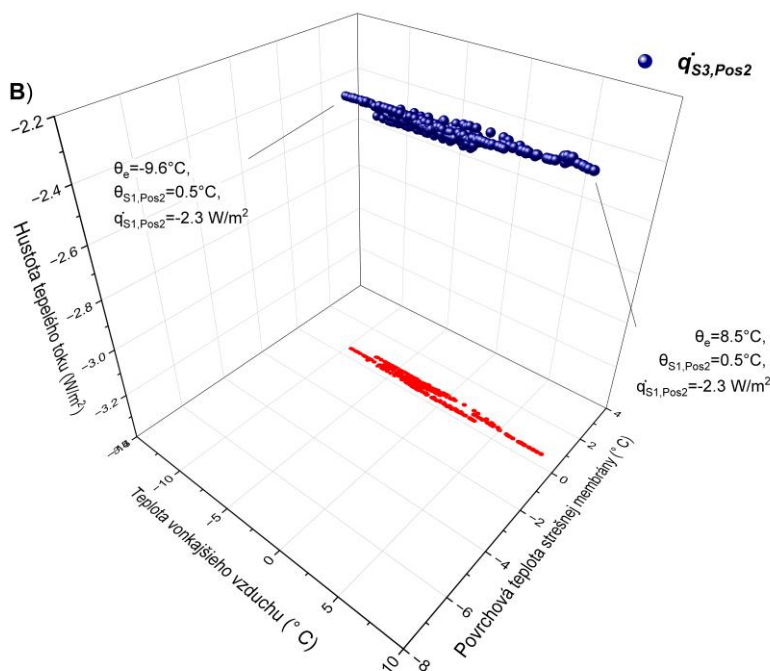
Účinok akumulácie latentného tepla, prejavujúci sa udržiavaním konštantného tepelného toku $\approx -2,5 \text{ W/m}^2$ cez S1, bol pozorovaný v širokom rozsahu vonkajších teplôt vzduchu (od $-7,3$ do $8,5^\circ\text{C}$), pričom povrchová teplota membrány zostávala blízko 0°C (obr. 4.31).



Obr. 4.31 Segment S1: hodinová hustota tepelného toku počas chladného obdobia TP2 bez snehu (5. – 20. 1. 2022), v kontexte vonkajšej teploty vzduchu a povrchovej teploty membrány

Postupná penetrácia mrazu do 120 mm hrubého substrátu spôsobovala jeho postupné zamŕzanie. Vplyv fázovej zmeny na teplotu okolia strešnej membrány bol minimalizovaný,

teplota substrátu klesala a tepelné straty sa zvyšovali. Vyššie (viac negatívne) tepelné toky boli pozorované aj pri teplotách vzduchu nad 0 °C, v čase, keď voda v póroch ešte nestihla rozmraziť, resp. bola v prechodnom stave. V segmente S3 (240 mm substrát) počas TP2 sa voda v substráte vyskytovala v kvapalnej alebo zmiešanej fáze (kvapalina/l'ad), čo umožnilo udržanie povrchovej teploty strešnej membrány v okolí 0 °C. Počas celej periódy TP2 bola cez segment S3 pozorovaná takmer konštantná hodnota hustoty tepelného toku $\approx -2,4 \text{ W/m}^2$ pri rozsahu teplôt vonkajšieho vzduchu od -9,6 do 8,5 °C (obr. 4.32).



Obr. 4.32 Hodinová hustota tepelného toku počas chladného obdobia TP2 bez snehu (5. – 20. 1.), v kontexte vonkajšej teploty vzduchu a povrchovej teploty membrány

Počas chladného obdobia so snehovou pokrývkou na experimentálnych segmentoch bolo naprieč všetkými skladbami (referenčná štrková a dve vegetačné) pozorované výrazné utlmenie variability tepelných tokov. V referenčnej skladbe môžeme tento efekt pripísať dočasnej tepelnoizolačnej funkcii snehu, ktorá zmenšovala teplotný gradient a viedla k stabilizovaným stratám. Skladby s vegetačnou vrstvou si v rovnakých podmienkach udržiavali takmer rovnaké správanie, pričom fázové prechody vody v substráte viazali a uvoľňovali latentné teplo a v okolí strešnej membrány sa dlhodobo udržiavala stabilná povrchová teplota blízka 0 °C. V chladnom období bez snehu referenčná strecha a vegetačná skladba s tenším substrátom vykazovali vyššiu citlivosť na okamžité klimatické podmienky, resp. ich zmeny. Počas slnečných zimných dní sa krátkodobo prejavovalo zníženie strát vplyvom zvýšenej absorpcie krátkovlnného žiarenia referenčnou štrkovou strechou, zatiaľ čo v noci dochádzalo k rýchlejšiemu ochladzovaniu pri nižšej tepelnej zotrvačnosti. Skladba s hrubším substrátom si udržiavala stabilný tepelný tok prakticky nezávislý od počasia. Vďaka vyššej schopnosti akumulovať vodu sú procesy uvoľňovania latentného tepla intenzívnejšie v porovnaní so skladbou s menšou hrúbkou substrátu, čo umožňuje udržiavanie povrchovej teploty v blízkosti strešnej membrány na teplotách blízky 0 °C aj počas dní s celodennými mrazmi. Z hľadiska návrhu skladby vegetačnej strechy to poukazuje na kľúčový význam hrúbky a retenčných vlastností substrátu pre zimnú stabilitu a predvídateľnosť tepelnej bilancie striech s vegetačnou vrstvou.

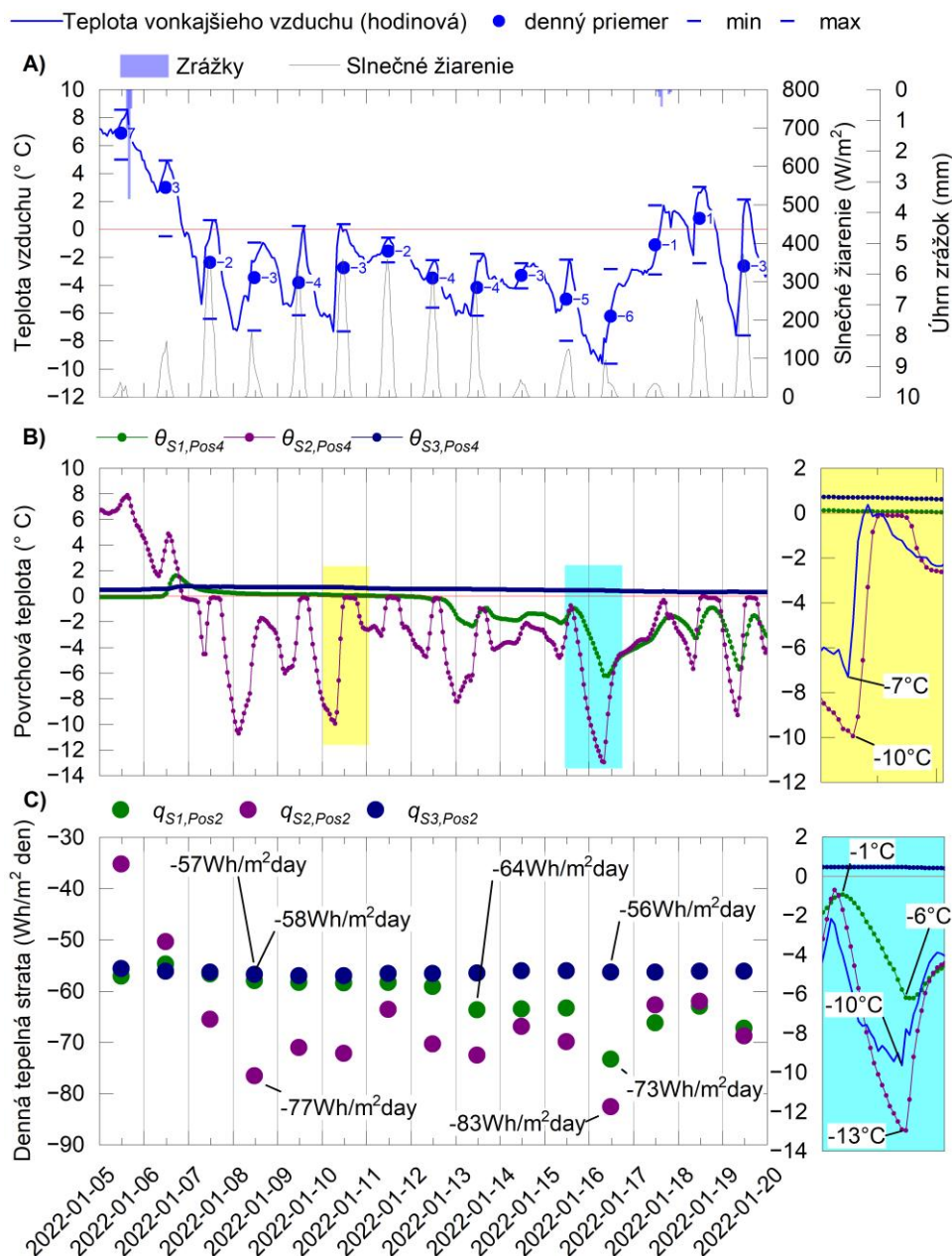
4.10 Analýza tepelných strát vegetačných striech

V predchádzajúcej kapitole boli analyzované okamžité hustoty tepelného toku cez referenčnú štrkovú strechu a dve vegetačné skladby počas dvoch zimných období (TP1 so snehovou pokrývkou a TP2 bez snehu). Bolo ukázané, že prítomnosť snehu a najmä latentné teplo viazané vo vode substrátu stabilizovali teplotné pole v okolí strešnej membrány a viedli k tlmeniu variability tokov, pričom pri epizódach bez snehovej vrstvy sa rozdiely medzi skladbami zväčšovali.

V tejto kapitole sa pozornosť presúva od okamžitých tokov tepla $\dot{q}$ (t) (W/m^2) k integrovaným stratám tepla na dennej a mesačnej škále, ktoré sú priamo použiteľné v energetickej praxi. Postup nadväzuje na už zavedenú metodiku merania v definovanej rovine strešného plášťa pomocou plošných snímačov a časovú integráciu $\dot{q}$ (t) na denné (resp. mesačné) hodnoty q ($\text{Wh/m}^2 \cdot \text{deň}$; $\text{Wh/m}^2 \cdot \text{mesiac}$), pri zachovaní jednotnej konvencie o znamienkach pri orientácii tepelného toku (záporné = tepelná strata, kladné = zisk). Takto definované ukazovatele umožňujú porovnať celkovú energetickú odozvu sledovaných skladieb pri identických okrajových podmienkach. Analytický rámec kapitoly je dvojstupňový: (i) najprv sa interpretujú denné tepelné straty počas chladnej periódy TP2 bez snehovej vrstvy v kontexte sprievodných klimatických parametrov a (ii) následne sa kvantifikuje mesačná a sezónna redukcia strát vegetačných skladieb voči referenčnej streche pomocou percentuálneho ukazovateľa Δq . Týmto spôsobom sa dopĺňa obraz z predošlých kapitol a fyzikálne mechanizmy identifikované na úrovni $\dot{q}$ (t) sú interpretované do energeticky zrozumiteľných súčtov, ktoré ukazujú, za akých podmienok prináša vegetačná strecha najväčší prínos počas zimného obdobia. Komplexná analýza tepelných strát pri variantných klimatických charakteristikách zimného obdobia je uvedená v štúdiu [1]

Chladné obdobie TP2 (5. – 20. január 2022) bez snehovej pokrývky sa začalo daždivým počasím 5. januára 2022 (obr. 4.33-A). Predchádzalo mu krátke teplé obdobie s nízkou intenzitou slnečného žiarenia, počas ktorého sa zvýšila povrchová teplota strešnej membrány v referenčnom segmente S2, zatiaľ čo povrchová teplota pod vegetačnými segmentmi zostávala približne na úrovni 0°C . Vyššia tepelno-akumulačná kapacita mokrých vrstiev substrátu udržiavala povrchovú teplotu membrány v oboch vegetačných segmentoch blízko 0°C . Následné postupné ochladzovanie sa prejavilo poklesom povrchovej teploty membrány v referenčnom segmente z 8°C na -11°C (obr. 4.33-B), pričom bol pozorovaný krátkodobý efekt akumulácie latentného tepla v mokrej geotextílii pod vrstvou štrku, ktorý sa prejavuje krátkodobým udržaním povrchovej teploty strešnej membrány v okolí 0°C . Podrobne je tento efekt pre rôzne zimné teplotné charakteristiky opísaný v pôvodnej štúdiu. Povrchová teplota membrány pod substrátmi oboch vegetačných segmentov zostávala napriek výraznému ochladeniu približne konštantná $\approx 0^\circ\text{C}$. Voda akumulovaná v substrátoch vegetačných striech sa nachádzala v prechodnom stave medzi kvapalnou a tuhú fázou a umožňovala uvoľňovanie latentného tepla, čím sa zmenšoval teplotný gradient v experimentálnych segmentoch s vegetačnou vrstvou. Počas nasledujúcich šiestich dní oscilovala povrchová teplota membrány v referenčnom segmente S2 medzi -11 a 0°C v závislosti od vonkajších klimatických podmienok, zatiaľ čo pod substrátmi vegetačných segmentov neklesla pod 0°C bez ohľadu na vonkajšie klimatické parametre. V noci v dôsledku dlhovoľnej radiácie výmeny klesala povrchová teplota membrány v referenčnom segmente pod teplotu vonkajšieho vzduchu. Počas slnečných dní (napr. 10. januára) bolo celkové denné slnečné žiarenie ($\sim 1,8 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{deň}$) spotrebované na premenu ľadu na vodu, a preto neprispelo k zvýšeniu povrchovej teploty membrány referenčného segmentu nad 0°C (obr. 4.33-B, žltý obdĺžnik).

Denná tepelná strata cez referenčný segment S2 bola silne ovplyvnená poklesom teploty vonkajšieho vzduchu a počas celodenných mrazov vzrástla na $-77 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{deň}$; zatiaľ čo v rovnakom čase bola denná strata pre obe vegetačné strechy približne $-57 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{deň}$, čo predstavuje redukciu tepelnej straty o približne 25 % (obr. 4.33-C) oproti referenčnému segmentu S2.



Obr. 4.33 Denné tepelné straty (C) cez segmenty S1, S2 a S3, povrchová teplota strešnej membrány (B) počas obdobia TP2 (5. – 20. január 2022) v kontexte klimatických parametrov (A)

Počas týchto chladných dní s celodennými mrazmi sa denná tepelná strata cez referenčný segment pohybovala v rozmedzí -64 až $-77 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{deň}$, zatiaľ čo oba vegetačné segmenty vykazovali konštantnú hodnotu približne $-57 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{deň}$ bez ohľadu na vonkajšie klimatické podmienky. Pretrvávajúce mrazivé počasie od 12. januára spôsobilo postupné zamŕzanie vody v okolí membrány pod 120 mm hrubým substrátom vo vegetačnom segmente S1. Zamrznutý

strešný substrát tvoril trojfázový systém tuhej matrice, vzduchom vyplnených pórov a zamrznutej pórovej vody a všetky tri fázy participovali na celkovej tepelnej vodivosti systému. Počas nasledujúcich troch dní (priemerná vonkajšia teplota -3 až -5 °C) bola povrchová teplota nameraná na strešnej membráne vo vegetačnom segmente ≈ -2 °C a denná tepelná strata ≈ -64 Wh/m²·deň.

V noci 16. januára klesla teplota vonkajšieho vzduchu na -10 °C. Povrchová teplota membrány v referenčnom segmente klesla v dôsledku dlhovlnnej radiačnej výmeny na -13 °C, zatiaľ čo pod 120 mm zamrznutým substrátom vo vegetačnom segmente neklesla povrchová teplota pod -6 °C. Napriek zamrznutému stavu substrát hrúbky 120 mm účinne spomaľoval ochladzovanie segmentu S1 (obr. 4.33-B, tyrkysový obdĺžnik). Aj počas tohto výrazného ochladenia s celodennými silnými mrazmi zostala povrchová teplota membrány v segmente S3 nad 0 °C. Dňa 16. januára, počas mrazivého dňa s nízkou slnečnou radiáciou bola denná tepelná strata nameraná cez vegetačný segment S1 -73 Wh/m²·deň, referenčný segment S2 mal dennú stratu -83 Wh/m²·deň, zatiaľ čo strata segmentu S3 zostala stále nezmenená ≈ -56 Wh/m²·deň.

Percentuálna denná redukcia tepelnej straty vegetačnej strechy vzhľadom na referenčnú štrkovú strechu sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\Delta q_{p2} = \frac{q_{\text{vegetačná strecha (S1,S3)}} - q_{\text{referenčná strecha (S2)}}}{q_{\text{referenčná strecha (S2)}}} \cdot 100$$

Počas chladného dňa 16. januára 2022 predstavovala redukcia tepelnej straty vegetačnou strechou s hrúbkou substrátu 120 mm (S1) 11 % a strechou s hrúbkou substrátu 240 mm (S3) až 32 % v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou.

Povrchová teplota meraná na strešnej membráne v segmente S3 zostávala počas celého obdobia TP2 približne konštantná (≈ 0 °C). Vyššie teploty membrány pod segmentom S3 boli spôsobené kombinovaným účinkom viacerých faktorov: vyššou tepelnou akumuláciou spojenou s hrubšou vrstvou substrátu (240 mm), dodatočnou tepelnou izoláciou tejto vrstvy, ale najmä vyššou retenčnou kapacitou, ktorá podporovala akumuláciu latentného tepla počas celého chladného obdobia bez prítomnosti snehu na experimentálnych segmentoch.

Mesačné redukcie kumulatívnych tepelných strát cez vegetačné strechy v porovnaní s referenčným segmentom (S2) sú zobrazené v Tab. 4.6. Tabuľka prehľadne rekapituluje redukciu tepelných strát Δq pre segmenty S1 a S3 voči štrkovej streche počas dvoch zimných sezón december – február 2020/2021 a 2021/2022.

V kontexte nameraných mesačných tepelných strát bol pozorovaný pozitívny účinok vegetačnej strechy na ich znižovanie. V každom analyzovanom mesiaci boli najvyššie mesačné straty zaznamenané cez referenčný segment S2 a najnižšie cez vegetačný segment S3. Najvyššia mesačná redukcia tepelných strát oboch vegetačných segmentov (S1 a S3) voči referenčnej (S2) bola zaznamenaná v januári 2021: zníženie o 12 % (S1) a 18 % (S3). Najnižšia mesačná redukcia bola pozorovaná vo februári 2022: 2 % (S1) a 6 % (S3). Sezónne zníženie (december – február) dosiahlo 9 % (S1) a 14 % (S3) počas zimy 2020/2021, resp. 6 % (S1) a 12 % (S3) počas zimy 2021/2022.

Tab. 4.6 Redukcia tepelných strát vegetačných striech (Δq) v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou (S2) v dvoch zimných obdobiach december – február 2020/2021 a 2021/2022

	Redukcia tepelnej straty Δq_{S1} cez segment S1/S2 (%)	Redukcia tepelnej straty Δq_{S3} cez segment S3/S2 (%)
December 2020	7	11
Január 2021	12	18
Február 2021	8	14
Sezónna redukcia	9	14
December 2021	6	13
Január 2022	11	17
Február 2022	2	6
Sezónna redukcia	6	12

Podľa údajov Slovenského hydrometeorologického ústavu za ostatných desať rokov priemerná mesačná teplota vonkajšieho vzduchu zaznamenaná v Košiciach v zimnom období neklesla pod 0 °C, s výnimkou roku 2017 s priemernou zimnou teplotou -2,7 °C. Vo všeobecnosti sa zimy na Slovensku stali miernymi až teplými, s minimálnou, nestabilnou a často žiadnou snehovou pokrývkou. Možno predpokladať – ako potvrdila zima 2023/2024, že na Slovensku budú naďalej prevládať teplé zimy, počas ktorých sa trvalá snehová pokrývka bude vyskytovať zriedkavo. Ako naznačujú výsledky meraní prezentované v tejto štúdii, z hľadiska budúcich klimatických trendov na Slovensku bude nezamrznutý substrát vegetačnej strechy bez trvalej snehovej pokrývky predstavovať významný potenciál na zníženie tepelných strát budov počas zimy.

Toto obdobie je kľúčové pre energetickú bilanciu budov nakoľko reprezentuje obdobie kedy majú budovy vysoké tepelné straty a nízke pasívne solárne zisky. Takéto podmienky predurčujú vegetačné strechy využiť svoj technický potenciál a v plnej miere sa stať rozdielovým hráčom v porovnaní s konvenčnými „holými (bare roof)“ alebo štrkovými strechami.

V predchádzajúcich podkapitolách bol priebežne hodnotený tepelný režim plochých striech s vegetačnou vrstvou a referenčnej štrkovej skladby na základe priamych meraní ich tepelnej odozvy. Ukázalo sa, že zimná odozva týchto konštrukcií je formovaná nielen stacionárnymi parametrami, ale najmä dynamickými javmi – radiačnou bilanciou, akumuláciou a latentným teplom viazaným na vodu v substráte. Prítomnosť snehovej pokrývky na experimentálnych segmentoch zásadne mení podmienky na povrchu strešnej membrány. a tým aj výsledný tepelný tok.

Počas epizód so snehovou pokrývkou bolo naprieč skladbami pozorované výrazné utlmenie variability tepelných tokov a zmenšenie rozdielov medzi systémami. V obdobiach bez snehu sa tepelná odozva skladieb diferencovala: referenčná skladba a vegetačná skladba s tenším substrátom vykazovali vyššiu citlivosť na okamžité klimatické podmienky, zatiaľ čo skladba s hrubším substrátom udržiavala stabilný tepelný tok a povrchovú teplotu strešnej membrány blízko 0 °C.

Na základe publikovaných experimentálnych údajov možno vyvodiť nasledujúce závery:

- Najvyššia účinnosť v redukovaní tepelných strát aplikovaním vegetačnej strechy bola pozorovaná počas po sebe nasledujúcich dní s celodennými mrazmi a nízkou intenzitou slnečného žiarenia. Za týchto podmienok boli tepelné straty vegetačných striech redukované až o 25 % (S1) a 32 % (S3) v porovnaní s referenčnou štrkovou

strechou S2. Kľúčovým faktorom participujúcim na znižovaní tepelných strát počas zimného obdobia bola akumulácia latentného tepla vodou vo vrstvách substrátov.

- Počas dní s celodennými teplotami nad 0 °C a s nízkou slnečnou radiáciou sa schopnosť vegetačných striech redukovať tepelné straty znižovala v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou [1].
- Prítomnosť snehovej vrstvy významne ovplyvňovala tepelnú odozvu tak vegetačných striech, ako aj referenčnej strechy. Vzhľadom na nízky počet dní so snehovou pokrývkou počas analyzovaných zím bol však vplyv snehu na tepelné straty experimentálnych striech zanedbateľný [1].

Dlhodobé merania ukázali, že účinnosť vegetačných striech pri redukcii tepelných strát v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou vykazovala výraznú variabilitu v zimných mesiacoch (december, január, február). Táto variabilita sa prejavila nielen medzi jednotlivými mesiacmi v tom istom roku, ale aj medzi jednotlivými rokmi navzájom. Zistenia poukazujú na fakt, že výskum založený na krátkodobých pozorovaniach potenciálu vegetačných striech redukovať tepelné straty môžu viesť k zavádzajúcim záverom [1].

Prezentované závery sú založené na meraniach konkrétnej budovy s definovanými stavebnými konštrukciami v konkrétnych klimatických podmienkach. Z tohto dôvodu je potrebné aplikovať uvedené zistenia v kontexte podmienok, ktoré tieto zistenia definovali. Napriek uvedenému sú prezentované výsledky použiteľné pre veľkú skupinu striech s podobnou skladbou.

4.11 Analýza environmentálnych dopadov variantov strešnej konštrukcie

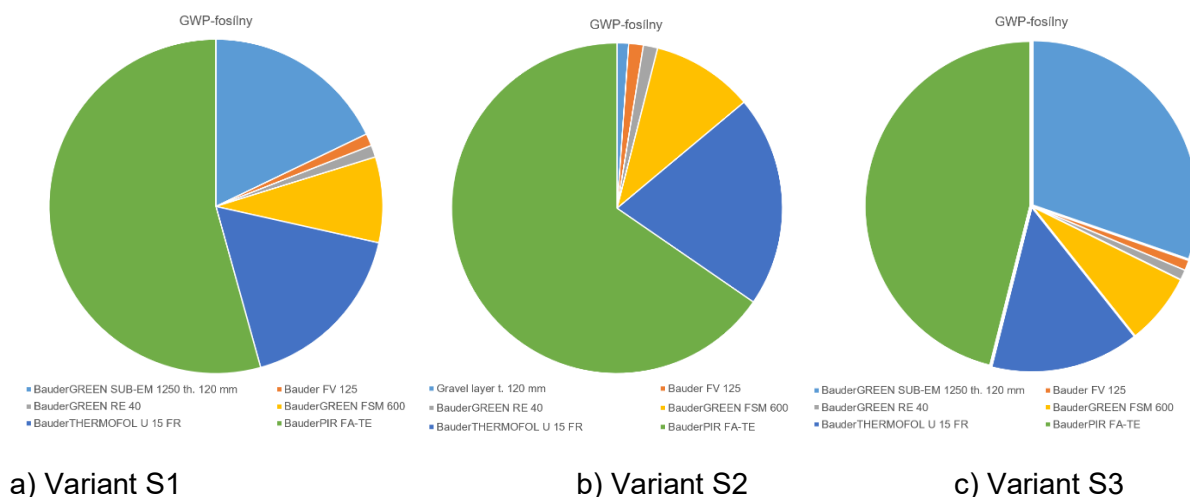
Analýza životného cyklu strešných konštrukcií bola vykonaná podľa metódy hodnotenia životného cyklu (LCA). Cieľom bolo hodnotiť a analyzovať varianty strešných konštrukcií S1, S2 a S3 z hľadiska vybraných environmentálnych indikátorov. Ako funkčná jednotka (FJ) bola zvolená 1 m² strešnej konštrukcie, pričom analýza zahŕňa nové materiály v rámci obnovy strešných konštrukcií (obr. 4.2). Odhadovaná životnosť bola stanovená na 50 rokov, v hranici systému „od kolísky po hrob“ a modul D predstavujúci prínosy a záťaže mimo systémovú hranicu. Na kvantifikáciu environmentálnych dopadov bol použitý softvér OneClickLCA (metodika Level(s) Life-cycle Assessment EN15804 +A2 [2], Verzia: 26.05.2, Databáza: 7.6), ktorý pracuje v súlade s normami ISO 14040, ISO 14044, STN EN 15804+A2/AC 9 a STN EN 15978. V rámci inventarizačnej analýzy boli zhromaždené údaje o navrhovaných materiáloch z dôvodu obnovy strešných konštrukcií. Vo fáze posudzovania vplyvov životného cyklu bola hodnotená kategória klimatická zmena. Hodnotenú indikátory boli potenciál globálneho otepľovania GWP-celkový, ktorý zahŕňal GWP-fosílny, GWP-biogénny a GWP-LULUC (Tab. 4.7).

Tab. 4.7 Výsledky hodnotenia potenciálu globálneho otepľovania

	Modul	GWP-celkový [kg CO _{2eq} /m ²]	GWP-fosílny [kg CO _{2eq} /m ²]	GWP-biogénny [kg CO _{2eq} /m ²]	GWP-LULUC [kg CO _{2eq} /m ²]
S1	A1-A3	27,43	27,3	0,0767	0,0562
	A4	0,438	0,438	0	0,0000153
	A5	2,4	2,25	0,145	0,00233
	B3	0	0	0	0
	B4-B5	14,14	14,13	0	0,0032
	C2	0,0234	0,0234	0,0000116	0,000000815
	C3	12,6	12,6	0	0,00102
	C4	0	0	0	0
	Celkom	57,03	56,74	0,222	0,063
S2	A1-A3	22,8	22,67	0,0766	0,0525
	A4	0,803	0,803	0	0,000028
	A5	2,4	2,25	0,145	0,00233
	B3	0	0	0	0
	B4-B5	14,14	14,13	0	0,0032
	C2	0,726	0,726	0,000361	0,0000253
	C3	13,22	13,22	0	0,00109
	C4	0	0	0	0
	Celkom	54,09	53,8	0,226	0,059
S3	A1-A3	32,31	32,17744	0,0769	0,0524
	A4	0,775	0,775	0	0,000027
	A5	2,4	2,25	0,145	0,00233
	B3	0	0	0	0
	B4-B5	14,14	14,13	0	0,0032
	C2	0,0234	0,0234	0,0000116	0,000000815
	C3	12,6	12,6	0	0,00102
	C4	0	0	0	0
	Celkom	62,24	61,96	0,222	0,059

Nasledujúce grafy (obr. 4.34) znázorňujú podiel materiálov na indikátor GWP-fosílny vo fáze produktu (A1-A3). Graf ukazuje, že GWP-fosílny pre variant S1 dosahuje hodnotu 27,3 kg CO_{2eq} na 1 m² strechy. Najväčší podiel má BauderPIR FA-TE (54%), potom BauderGREEN

SUB-EM (18%) a BauderTHERMOFOL U 15 FR (17%). Ostatné materiály majú podstatne menší vplyv. Variant S2 je z porovnávaných variantov vo fáze A1-A3 najpriaznivejší, s hodnotou 22,7 kg CO_{2eq}/m² strechy. Z materiálov opäť dominuje BauderPIR FA-TE (65%), ale celkový dopad je nižší než pri S1 a S3. Variant S3 má najvyšší GWP-fosílny vo fáze A1-A3, a to hodnotu 32,3 kg CO_{2eq}/m². Hlavným dôvodom je vyšší podiel BauderGREEN SUB-EM (30%), pričom stále najväčší podiel má BauderPIR FA-TE (46%). Tento variant je teda z pohľadu výroby najmenej výhodný.



Obr. 4.34 Podiel materiálov na GWP-fosílny vo fáze produktu

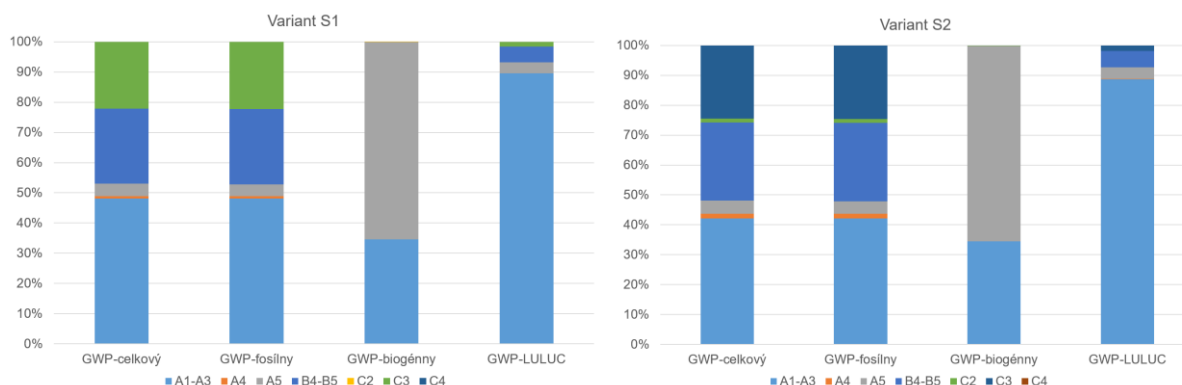
Pri porovnaní variantov vo fáze produktu je z obr. xy zrejmé, že variant S2 dosahuje najnižšiu hodnotu a S3 najvyššiu hodnotu GWP-fosílny. Rozdiel medzi variantmi nie je značný. Pri hodnotení celého životného cyklu (A1-C4) zostáva poradie variantov rovnaké, a to variant S2 vychádza najlepšie s hodnotou 53,8 kg CO_{2eq}/m² strechy, potom S1 s hodnotou 56,74 kg CO_{2eq}/m² strechy a S3 najhoršie s hodnotou 61,96 kg CO_{2eq}/m² strechy. To znamená, že hoci variant S3 vykazuje najvyšší dopad vo výrobe, v hodnotení celého životného cyklu sa z pohľadu GWP-fosílny nejaví ako najvýhodnejšie riešenie. Výber optimálneho riešenia by preto mal vychádzať z komplexného posúdenia všetkých fáz životného cyklu a súčasne zohľadniť aj technické, energetické a hydrologické prínosy jednotlivých variantov.

Grafy (obr. 4.35) znázorňujú podiel jednotlivých fáz životného cyklu hodnotených strešných skladieb potenciálu na GWP-celkový. Hodnotenie zahŕňa fázy od výroby stavebných výrobkov až po koniec životnosti konštrukcie (A1-A3, A4, B4-B5, C2-C4).

Variant S1 má hodnotu GWP-celkový 57,0 kg CO_{2eq}/m², pričom fosílna zložka predstavuje 56,74 kg CO_{2eq}/m². Najväčší podiel na GWP-celkový má fáza A1-A3 (výroba stavebných výrobkov) s hodnotou 27,43 kg CO_{2eq}/m², čo predstavuje 48,1%. Významný príspevok majú moduly B4-B5 (výmena a obnova prvkov počas životnosti) s hodnotou 14,14 kg CO_{2eq}/m² (24,79%) a fáza konca životnosti C2-C4 (transport odpadu a spracovanie po skončení životnosti) s hodnotou 12,62 kg CO_{2eq}/m² (22,13%). Doprava materiálov na stavbu (A4) a proces výstavby (A5) majú v porovnaní s ostatnými etapami podstatne nižší vplyv (4,98%).

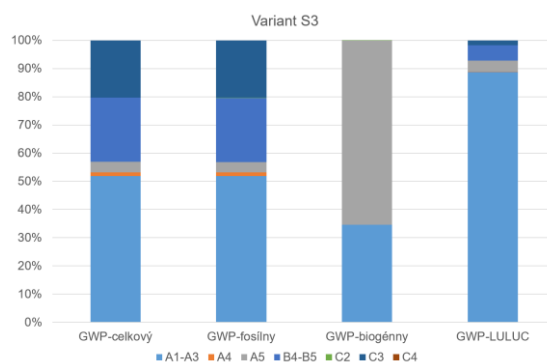
Variant S2 vykazuje najnižšiu hodnotu 54,09 kg CO_{2eq}/m² pre GWP-celkový, pričom fosílna zložka predstavuje 53,8 kg CO_{2eq}/m². Najvýznamnejšou fázou je výroba stavebných výrobkov (s hodnotou 22,80 kg CO_{2eq}/m², čo je najnižšia hodnota spomedzi porovnávaných variantov s podielom 42,15%). Moduly B4-B5 dosahujú rovnakú hodnotu ako pri ostatných variantoch

14,14 kg CO_{2eq}/m², čo predstavuje 26,14%. Fáza konca životnosti C2–C4 predstavuje 13,95 kg CO_{2eq}/m². Doprava materiálov na stavbu (A4) a proces výstavby (A5) majú v porovnaní s ostatnými etapami podstatne nižší vplyv (5,92%). Výsledky naznačujú, že výber materiálov je kľúčový pre významne zníženie celkového environmentálneho dopadu počas životného cyklu.



a) Variant S1

b) Variant S2

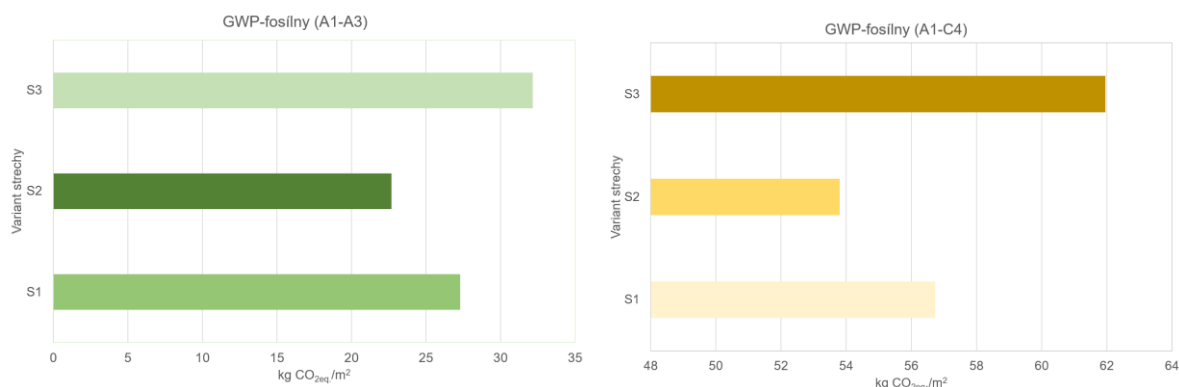


c) Variant S3

Obr. 4.35 Podiel fáz životného cyklu na GWP-fosilny vo fáze produktu

Variant S3 dosahuje najvyšší GWP-celkový zo všetkých posudzovaných variantov, a to hodnotu 62,25 kg CO_{2eq}/m², pričom fosílna zložka predstavuje 61,96 kg CO_{2eq}/m². Rozhodujúci podiel má fáza A1–A3 s hodnotou 32,31 kg CO_{2eq}/m² (51,9%), ktorá je výrazne vyššia ako pri variantoch S1 a S2. Moduly B4–B5 dosahujú rovnakú hodnotu ako pri ostatných variantoch 14,14 kg CO_{2eq}/m² (22,72%) a fáza konca životnosti C2–C4 predstavuje 12,62 kg CO_{2eq}/m² (20,28%). Zvýšenie dopadu vo fáze produktu spôsobilo, že variant S3 nie je environmentálne najvýhodnejší, ale naopak dosahuje najvyššiu celkovú uhlíkovú stopu.

Porovnanie výsledkov ukazuje, že najväčší podiel na environmentálnom dopade všetkých hodnotených skladieb má výroba stavebných materiálov (A1–A3) a následná výmena materiálov počas životnosti (B4–B5). Rozdiely medzi jednotlivými variantmi vznikajú predovšetkým v dôsledku odlišného materiálového zloženia. Zatiaľ čo z pohľadu hodnotenia fázy produktu vykazuje najlepšie výsledky variant S2, pri hodnotení celého životného cyklu (A1–C4) dosahuje najnižší environmentálny dopad variant S3, ktorý možno považovať za najvýhodnejšie riešenie z hľadiska celkovej uhlíkovej stopy.



a) Fáza produktu

b) Celý životný cyklus

Obr. 4.36 Výsledky hodnotenia GWP-fosilny pre tri varianty strešných konštrukcií

Obrázok 4.36 porovnáva hodnoty GWP-fosilny pre fázu produktu a pre celý životný cyklus. Z porovnania vyplýva, že rozdiely vo výrobnej fáze majú významný vplyv aj na celkové výsledky životného cyklu. Z pohľadu hodnotenia LCA je preto možné konštatovať, že variant S2 predstavuje environmentálne najvýhodnejšie riešenie, zatiaľ čo variant S3 vykazuje najvyššiu uhlíkovú stopu počas celého sledovaného životného cyklu konštrukcie.

Vplyv vegetačnej vrstvy na biogénnu zložku GWP

Pri hodnotení environmentálnych dopadov vegetačných striech je potrebné okrem emisií fosílného pôvodu zohľadniť aj schopnosť vegetácie viazať atmosférický uhlík prostredníctvom fotosyntézy. Tento proces sa v metodike hodnotenia životného cyklu (LCA) premieta do indikátora GWP-biogénny, ktorý vyjadruje ukladanie biogénneho uhlíka v rastlinnej biomase a organickej zložke substrátu (EN 15804+A2). Vegetačné strechy predstavujú špecifický prípad stavebných konštrukcií, pretože počas prevádzky fungujú ako biologicky aktívne systémy schopné zachytávať atmosférický CO₂ a ukladať ho v rastlinnej biomase aj v substráte (Getter et al., 2021; Liu et al., 2021). Vegetačné strechy s porastom sukulentov rodu *Sedum* sú charakteristické schopnosťou dlhodobo akumulovať uhlík, pričom jeho množstvo závisí od druhového zloženia vegetácie, klimatických podmienok, hĺbky substrátu a veku vegetačného systému (Liu et al., 2021). V hodnotených variantoch S1 a S3 je použitá rovnaká sukulentná vegetácia, avšak variant S3 obsahuje dvojnásobnú hrúbku vegetačného substrátu. Táto skutočnosť má významný vplyv na potenciál sekvestrácie uhlíka. Zatiaľ čo vegetácia zabezpečuje príjem uhlíka prostredníctvom fotosyntézy, substrát predstavuje hlavný zásobník organického uhlíka počas dlhodobého fungovania vegetačnej strechy. Viaceré štúdie preukázali, že s rastúcou hrúbkou substrátu rastie aj množstvo akumulovaného uhlíka, keďže väčší objem substrátu umožňuje vyššiu akumuláciu organickej hmoty a intenzívnejší rozvoj koreňového systému rastlín (Liu et al., 2021; Whittinghill et al., 2014).

Z publikovaných prác vyplýva, že extenzívne vegetačné strechy s dominantným zastúpením druhov *Sedum* dokážu každoročne viazať približne 141 g C/m², čo zodpovedá približne 0,517 kg CO₂/m²·rok¹ (Getter et al., 2021). Tento proces predstavuje významný environmentálny benefit vegetačných striech, pretože časť atmosférického uhlíka je počas prevádzky budovy dočasne uložená v biomase rastlín a v organickej hmote substrátu.

Výpočet množstva viazaného CO₂ počas predpokladanej životnosti strechy 50 rokov pre variant S1 je nasledovný:

$$141 \text{ g C/m}^2 \cdot \text{rok} \times \frac{44}{12} = 517 \text{ g CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{rok}$$

$$517 \text{ g CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{rok} = 0,517 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{rok}$$

$$0,517 \times 50 = 25,85 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$$

Počas 50-ročnej životnosti vegetačnej strechy je teda možné predpokladať viazanie približne

$$25,9 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$$

atmosférického oxidu uhličitého.

V prípade variantu S3 je vzhľadom na dvojnásobnú hrúbku substrátu možné očakávať vyššiu akumuláciu uhlíka. Literatúra uvádza, že zvýšenie hrúbky substrátu vedie k významnému nárastu zásob uhlíka, pričom nárast nie je striktne lineárny, ale závisí od fyzikálnych vlastností substrátu, obsahu organických látok a vegetačného pokryvu [3]. Pri konzervatívnom odhade zvýšenia potenciálu sekvestrácie o 50 % možno pre variant S3 uvažovať:

$$25,85 \times 1,5 = 38,78 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$$

teda približne

$$38,8 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$$

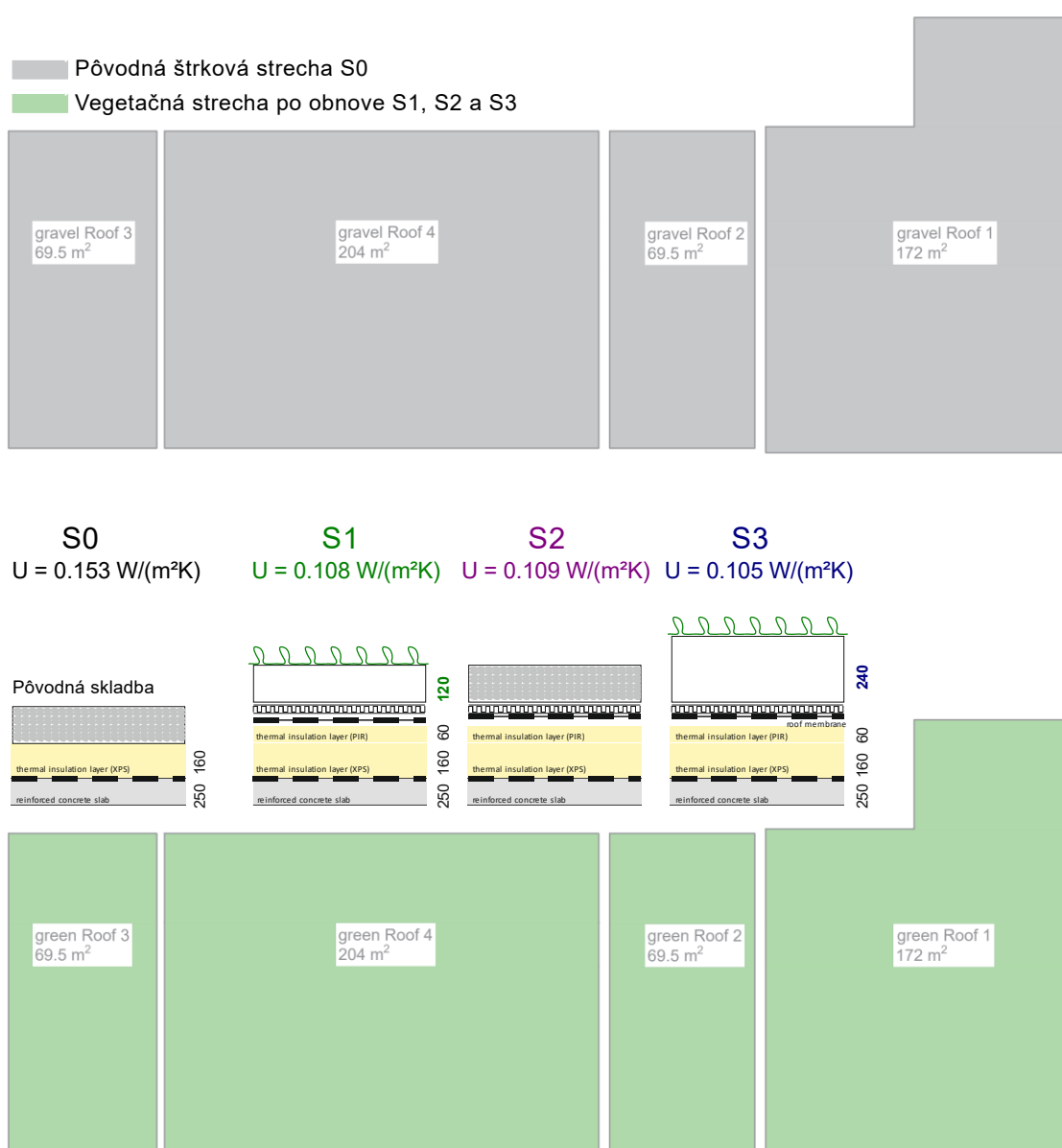
počas 50 rokov prevádzky.

Z výsledkov vyplýva, že oba varianty dosahujú priaznivejšiu bilanciu v kategórii GWP-biogénny, avšak vďaka väčšej hrúbke substrátu vykazuje variant S3 vyšší potenciál viazania atmosférického uhlíka. Zatiaľ čo pri variante S1 možno počas životnosti predpokladať sekvestráciu približne 25,9 kg CO₂/m², pri variante S3 môže táto hodnota dosiahnuť približne 38,8 kg CO₂/m². Rozdiel medzi variantmi teda predstavuje 33,3% v prospech variantu S3. Tieto výsledky naznačujú, že pri hodnotení vegetačných striech nie je postačujúce sledovať iba indikátor GWP-fosílny. Význam vegetačných striech z hľadiska klimatekovej zmeny preto nespočíva len v znižovaní energetickej náročnosti budov a zlepšovaní mikroklimy, ale aj v ich schopnosti fungovať ako dočasné úložisko uhlíka v urbanizovanom prostredí [3], [4] a [5]. Napriek tomu je potrebné zdôrazniť, že biogénny uhlík je v systéme uložený len dočasne a jeho ďalší osud závisí od spôsobu nakladania s vegetáciou a substrátom po skončení životnosti strechy [5]. Z pohľadu komplexného hodnotenia životného cyklu vegetačné strechy predstavujú riešenie, ktoré okrem adaptačných funkcií prispieva aj k zmierňovaniu klimatekovej zmeny prostredníctvom dlhodobého viazania atmosférického uhlíka.

4.12 Energetické, konštrukčné a environmentálne prínosy vegetačných striech pri obnove budov

V predchádzajúcich kapitolách bola analyzovaná tepelná odozva experimentálnych vegetačných striech S1 a S3 a referenčnej štrkovej strechy S2 počas zimných období. Výsledky preukázali, že napriek takmer identickým hodnotám súčiniteľa prechodu tepla vykazovali jednotlivé skladby rozdielne správanie z pohľadu tepelných strát, stability teplotného poľa a teplotného namáhania hydroizolačnej membrány.

Pri hodnotení vegetačných striech v procese obnovy budov preto nie je vhodné vychádzať výlučne z jednoduchšej ekonomickej návratnosti založenej na úspore energie. Vegetačná strecha predstavuje konštrukčné opatrenie s viacnásobným účinkom, ktorého prínosy sa prejavujú súčasne v oblasti tepelnej ochrany, ochrany strešnej membrány, hospodárenia so zrážkovou vodou a environmentálnej bilancie použitých materiálov.



Obr. 4.37 Aplikácia skladieb pre strechy budovy Izola Košice, s.r.o.

V prípade analyzovaného objektu bola pôvodná strešná skladba S0 s hodnotou súčiniteľa prechodu tepla $U = 0,153 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ porovnávaná s tromi alternatívnymi riešeniami obnovy. Variant S2 predstavuje referenčnú strechu so štrkovou vrstvou, zatiaľ čo varianty S1 a S3 predstavujú vegetačné strechy s hrúbkou substrátu 120 mm a 240 mm. Výsledné hodnoty súčiniteľa prechodu tepla dosiahli $0,108 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ pre S1, $0,109 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ pre S2 a $0,105 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ pre S3. Z pohľadu stacionárneho hodnotenia sú rozdiely medzi novými skladbami minimálne.

Dlhodobé experimentálne merania však preukázali, že vegetačné strechy dosahujú vyššiu schopnosť redukcie tepelných strát počas zimného obdobia. Priemerná sezónna redukcia tepelných strát v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou predstavovala približne 10 % pre variant S1 a 14 % pre variant S3. Najvýraznejší efekt bol pozorovaný počas dlhodobých období so zápornými vonkajšími teplotami bez súvislej snehovej pokrývky, keď sa významne prejavil vplyv akumulácie vody a latentného tepla v substráte vegetačných striech [1].

Významným prínosom vegetačných striech je aj ochrana hydroizolačnej membrány. Vegetačné vrstvy redukovali extrémne povrchové teploty, znižovali denné teplotné amplitúdy a spomaľovali prienik teplotných zmien do strešného plášťa. V prípade referenčnej štrkovej strechy boli zaznamenané výrazne vyššie teplotné výkyvy ako pri vegetačných skladbách. Hrubšia substrátová vrstva v segmente S3 vykazovala najvyššiu schopnosť stabilizácie povrchovej teploty membrány. Z hľadiska dlhodobej funkčnosti strešného plášťa je tento efekt významný, pretože opakované teplotné namáhanie patrí medzi faktory ovplyvňujúce životnosť hydroizolačných vrstiev.

Z pohľadu ochrany hydroizolačnej membrány je možné prínos vegetačných striech kvantifikovať podobným spôsobom ako pri hodnotení tepelných strát. Referenčná štrková strecha S2 vykazovala počas monitorovaného zimného obdobia najväčší rozsah povrchových teplôt membrány, od $-13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+31 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Celkové rozpätie teplotného namáhania tak dosiahlo 44 K. Pri vegetačnej streche S1 so substrátom hrúbky 120 mm boli povrchové teploty membrány v rozsahu od $-7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+19 \text{ }^{\circ}\text{C}$, čo predstavuje rozpätie 26 K. V porovnaní s referenčnou štrkovou strechou ide o zníženie celkového teplotného rozpätia približne o 41 %. Pri vegetačnej streche S3 so substrátom hrúbky 240 mm boli povrchové teploty membrány v rozsahu od $-0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+17 \text{ }^{\circ}\text{C}$, teda s celkovým rozpätím približne 17,4 K. V tomto prípade bola redukcia teplotného rozpätia v porovnaní s referenčnou strechou približne 60 %.

Výrazné rozdiely sa prejavili najmä počas hlavných zimných mesiacov december, január a február. V tomto zimnom období sa povrchová teplota membrány pod referenčnou štrkovou strechou S2 pohybovala v rozsahu od $-13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+19 \text{ }^{\circ}\text{C}$, teda v rozpätí 32 K. Pri vegetačnej streche S1 bol rozsah povrchových teplôt od $-7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+12 \text{ }^{\circ}\text{C}$, čo predstavuje rozpätie 19 K a redukciiu približne o 41 %. Pri vegetačnej streche S3 bol rozsah teplôt od $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, teda iba 9 K, čo zodpovedá redukcii zimného teplotného rozpätia približne o 72 % v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou.

Ešte výraznejší rozdiel bol zaznamenaný počas januára 2022, ktorý predstavoval najchladnejší mesiac celého analyzovaného obdobia. Povrchová teplota membrány v referenčnom segmente S2 sa pohybovala od $-13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, teda v rozpätí 21 K. Pri streche S1 bol rozsah od $-7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, čo predstavuje rozpätie 9 K a redukciiu približne o 57 %. Pri streche S3 zostávala povrchová teplota membrány v rozsahu od $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, teda iba v rozpätí 1 K. V porovnaní s referenčnou štrkovou strechou to predstavuje redukciiu teplotného rozpätia približne o 95 %.

Z hľadiska krátkodobého teplotného namáhania je významným ukazovateľom najvyššia denná amplitúda povrchovej teploty membrány. V referenčnej štrkovej streche S2 dosahovala počas zimného monitorovania hodnoty od 8,5 °C do 30,6 °C. Pri vegetačnej streche S1 sa najvyššie denné amplitúdy pohybovali od 2,0 °C do 10,4 °C a pri vegetačnej streche S3 iba od 0,3 °C do 3,3 °C. Maximálna denná amplitúda bola teda pri streche S1 nižšia približne o 66 % a pri streche S3 približne o 89 % v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou.

Dôležitým ukazovateľom ochrany hydroizolačnej membrány je aj čas, počas ktorého bola membrána vystavená teplotám pod 0 °C. V referenčnom štrkovom segmente S2 boli povrchové teploty membrány pod 0 °C zaznamenané počas 2753 hodín v spoločnom období monitorovania rokov 2020/2021 a 2021/2022. Pri vegetačnej streche S1 boli v rovnakom porovnateľnom období teploty membrány pod 0 °C zaznamenané počas 1247 hodín, čo predstavuje zníženie expozičného času približne o 55 %. Pri vegetačnej streche S3 boli povrchové teploty membrány pod 0 °C zaznamenané iba počas 67 hodín, pričom neklesli pod -0,5 °C. V porovnaní s referenčnou strechou ide o redukciu času vystavenia membrány teplotám pod bodom mrazu približne o 98 %.

Vegetačné vrstvy zároveň významne ovplyvňovali časový priebeh teplotnej odozvy. Počas slnečných zimných dní bol pri vegetačnej streche S1 zaznamenaný posun teplotného maxima približne o 4 hodiny v porovnaní s referenčnou štrkovou strechou S2. Pri streche S3 so substrátom hrúbky 240 mm dosiahol tento posun až 11 hodín. Tento jav dokumentuje vyššiu tepelnú zotrvačnosť vegetačných skladieb a ich schopnosť spomaľovať prienik teplotného impulzu k hydroizolačnej membráne. Sumarizácia kvantifikovaných ukazovateľov teplotného namáhania hydroizolačnej membrány je uvedená v tab. 4.8.

Z uvedených údajov vyplýva, že vegetačné strechy znižujú nielen tepelné straty, ale aj teplotné namáhanie hydroizolačnej vrstvy. Pri streche S1 bol pozorovaný výrazný pokles extrémnych hodnôt a redukcia času vystavenia membrány mrazovým teplotám. Strecha S3 vykazovala najvyššiu stabilizačnú schopnosť, keď počas najchladnejšieho mesiaca udržiavala povrchovú teplotu membrány prakticky v rozsahu 0 až +1 °C. Tento efekt je z hľadiska obnovy budov významný, pretože stabilizácia teplotného režimu strešnej membrány môže prispievať k zníženiu jej dlhodobého teplotného namáhania a k predĺženiu funkčnej životnosti strešného plášťa.

Ďalším kľúčovým parametrom pri hodnotení obnovy budov je schopnosť strešnej konštrukcie regulovať odtok zrážkovej vody. Pri konvenčných strešných skladbách je zrážková voda z povrchu strechy prevažne rýchlo odvádzaná do kanalizačného systému. Vegetačné strechy však časť zrážkovej vody zadržiavajú v substráte, retenčných prvkoch a ochranných vrstvách, čím znižujú okamžitý odtok a predlžujú čas odtoku zo strešnej konštrukcie. Tento efekt je možné vyjadriť prostredníctvom odtokového súčiniteľa.

Odtokový súčiniteľ predstavuje bezrozmerný parameter vyjadrujúci podiel zrážkovej vody, ktorý zo strechy odtečie po dopade zrážky na jej povrch. Čím je jeho hodnota nižšia, tým väčší podiel vody je dočasne zadržaný v strešnom súvrství, využitý vegetáciou alebo následne odparený späť do okolitého prostredia. Pri vegetačnej streche S1 so substrátom hrúbky 120 mm je podľa údajov výrobcu stanovených v zmysle metodiky FLL odtokový súčiniteľ 0,1. Pri streche S3 so substrátom hrúbky 240 mm je vzhľadom na vyššiu retenčnú kapacitu substrátovej vrstvy uvádzaná hodnota odtokového súčiniteľa menšia ako 0,1 [6].

Tab. 4.8 Kvantifikácia vplyvu strešných skladiieb S1, S2 a S3 na teplotné namáhanie hydroizolačnej membrány

Ukazovateľ/Skladba	S2	S1	S3
Celkový rozsah teploty membrány počas monitorovaného zimného obdobia	44 K	26 K	17,4 K
Redukcia celkového rozsahu teplôt počas monitorovaného zimného obdobia voči S2	–	41%	60%
Rozsah teploty membrány počas hlavných zimných mesiacov december – február	32 K	19 K	9 K
Redukcia rozsahu teplôt počas hlavných zimných mesiacov voči S2	–	41%	72%
Rozsah teploty membrány v januári 2022	21 K	9 K	1 K
Redukcia rozsahu teploty v januári 2022 voči S2	–	57%	95%
Maximálna denná teplotná amplitúda $\theta_{\Delta T24,max}$	30,6 K	10,4 K	3,3 K
Redukcia maximálnej dennej teplotnej amplitúdy voči S2	–	66%	89%
Čas membrány povrchová teplota pod 0 °C	2753 h	1247 h	67 h
Redukcia času pod 0 °C voči S2	–	55%	98%
Fázový posun teplotného maxima voči S2	–	4 h	11 h

Metodika FLL [6] predstavuje odborný nemecký súbor pravidiel pre plánovanie, realizáciu a údržbu vegetačných striech. V európskej praxi sa používa ako významný referenčný rámec na hodnotenie technických, vegetačných a hydrologických vlastností vegetačných strešných systémov. Uvedenie odtokového súčiniteľa v zmysle FLL preto umožňuje zaradiť hodnotenú skladbu do štandardizovaného systému posudzovania retenčných vlastností vegetačných striech.

Vzhľadom na celkovú plochu analyzovaných strešných konštrukcií približne 515 m² predstavuje zníženie odtokového súčiniteľa významný príspevok k hospodáreniu so zrážkovou vodou na úrovni objektu. Pri aplikácii vegetačných striech sa znižuje zaťaženie dažďovej kanalizácie, predlžuje sa čas odtoku a zvyšuje sa podiel vody, ktorá zostáva dostupná pre evapotranspiráciu. Tento prínos nadobúda osobitný význam v urbanizovanom prostredí s vysokým podielom nepriepustných plôch, kde rýchly povrchový odtok zrážkových vôd predstavuje jeden z hlavných problémov pri adaptácii miest na intenzívne dažďové udalosti.

Výsledky analýzy životného cyklu uvedené v predchádzajúcej kapitole dopĺňajú technické hodnotenie strešných skladiieb o environmentálny rozmer. Z pohľadu základného LCA hodnotenia v rozsahu A1–C4 dosiahol najnižšiu uhlíkovú stopu variant S2, nasledovaný variantom S1. Najvyšší environmentálny dopad vykázal variant S3, čo súvisí najmä s jeho vyššou materiálovou náročnosťou a väčšou hrúbkou vegetačného substrátu.

Tento výsledok však nemožno interpretovať izolovane. Variant S2 je najpriaznivejší z hľadiska GWP, ale neposkytuje funkčné prínosy vegetačných striech. Variant S1 predstavuje vyvážené riešenie medzi environmentálnou záťažou a technickými benefitmi, keďže pri mierne vyššej uhlíkovej stope prináša redukcii tepelných strát, zníženie teplotného namáhania hydroizolačnej membrány a odtokový súčiniteľ 0,1 podľa metodiky FLL. Variant S3 má síce najvyššiu uhlíkovú stopu, ale zároveň dosahuje najvýraznejšiu stabilizáciu teploty membrány, najnižší čas vystavenia membrány teplotám pod bodom mrazu a najvyšší predpokladaný retenčný účinok.

Je potrebné zdôrazniť, že základný LCA scenár uvažoval výmenu a obnovu prvkov počas životnosti konzervatívne rovnako pre všetky varianty. Možné predĺženie životnosti hydroizolačnej membrány v dôsledku nižšieho teplotného namáhania preto nie je v tomto hodnotení samostatne započítané.

Z uvedeného vyplýva, že hodnotenie vegetačných striech pri obnove budov musí byť viackriteriálne. Samotná U-hodnota popisuje iba stacionárnu tepelnotechnickú kvalitu skladby. Experimentálne merania však preukázali, že reálne správanie vegetačných striech je ovplyvnené aj tepelnou akumuláciou, vlhkostným režimom, fázovými premenami vody a hydrologickou funkciou strešného súvrstvia. Vegetačné strechy preto nemožno hodnotiť iba ako dodatočnú vrstvu strešného plášťa, ale ako komplexné technické opatrenie obnovy budov s energetickým, konštrukčným, hydrologickým a environmentálnym účinkom.

Literatúra

- 1 M. Vertal, K. L. Cakyova, J. Pencik, D. Beckovsky, A. Vargova, and V. Jan, "Thermal performance of two different green roofs throughout three winters in Slovakia," *Energy Build*, vol. 344, p. 116024, Oct. 2025, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2025.116024.
- 2 EN 15804+A2: Trvalá udržateľnosť výstavby – Environmentálne vyhlásenie o produkte – Základné pravidlá kategórie stavebných výrobkov.
- 3 LIU, H., ZHANG, K., LI, Y. et al. 2021. Carbon storage and sequestration by green roofs: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(45), 63895–63910.
- 4 GETTER, K. L., ROWE, D. B., ROBERTSON, G. P., CREGG, B. M., ANDRESEN, J. A. 2021. Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(3), e2020JG005879.
- 5 ANDERSON, E. C., MINER, G. L., PETERS, E. B. et al. 2023. Green roofs as carbon sinks in urban environments: long-term implications for climate mitigation. *Nature Communications*, 14, 5854.
- 6 FLL. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs – Green Roof Guidelines. 2018 edition. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL), 2018.

5 Rekonštrukcia základnej školy - analýza dekarbonizačného potenciálu a ekonomických aspektov

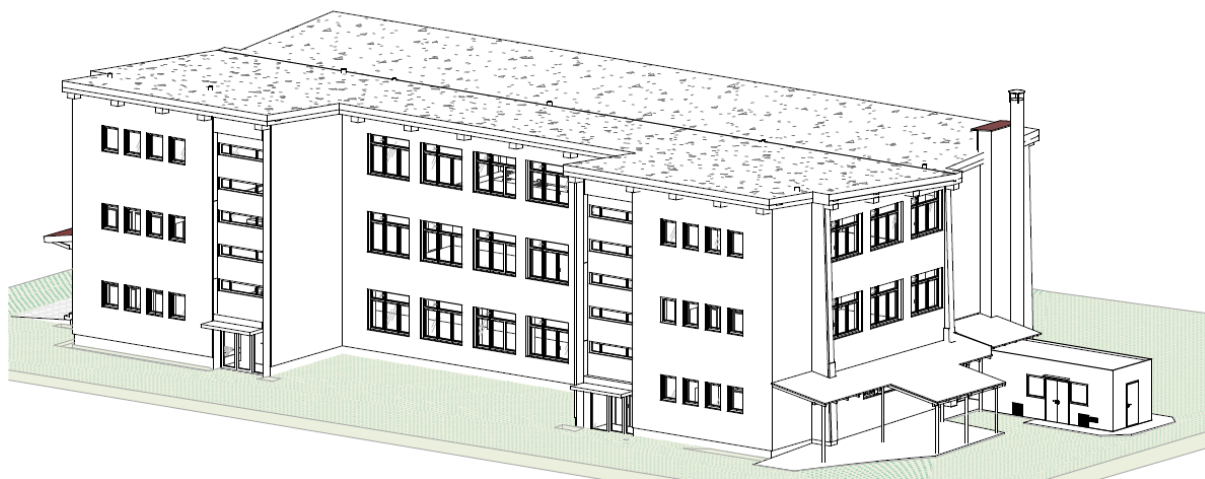
Hlavným cieľom tejto kapitoly je komplexná environmentálna a ekonomická analýza hĺbkovej rekonštrukcie konkrétneho objektu – budovy základnej školy. Prostredníctvom tejto prípadovej štúdie sa kvantifikuje nielen potenciál úspor primárnej energie a zníženia emisií skleníkových plynov (v prevádzkovej aj viazanej fáze), ale zároveň posudzuje aj ekonomická efektívnosť a návratnosť investovaných prostriedkov.

Zameranie na segment základných škôl má okrem technicko-ekonomického rozmeru aj silný spoločenský aspekt. Modernizácia vzdelávacej infraštruktúry totiž priamo prispieva k skvalitneniu vnútorného prostredia pre žiakov a pedagógov a zároveň slúži ako príklad dobrej praxe pre samosprávy, ktoré nesú hlavnú zodpovednosť za obnovu regionálneho školstva na Slovensku.

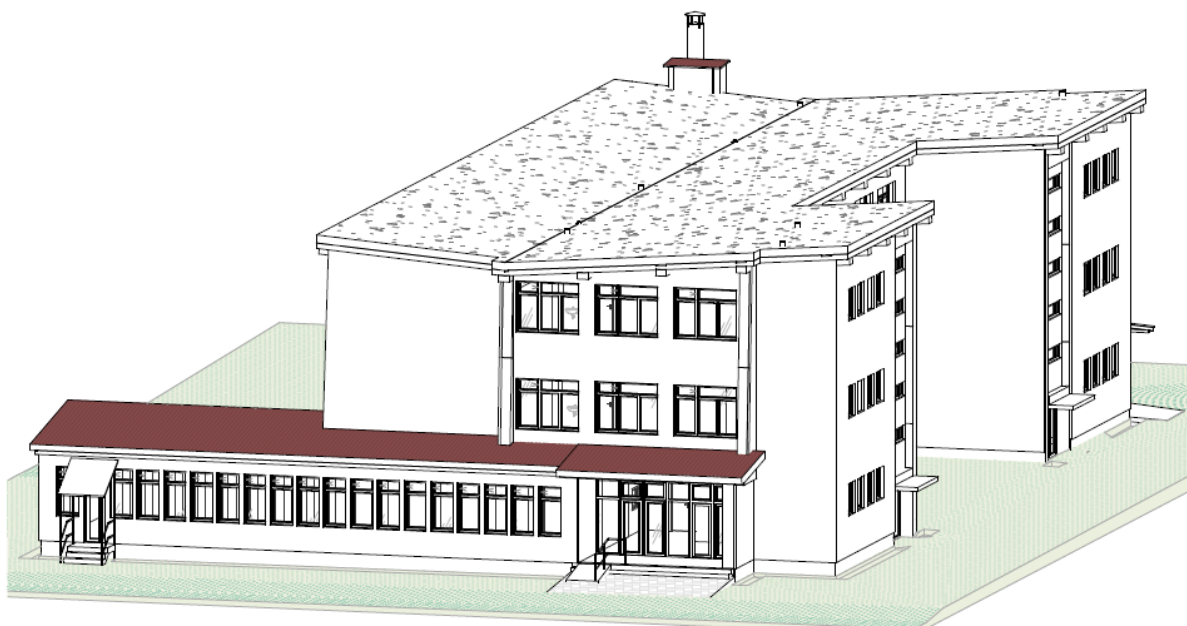
5.1 Inventarizačná analýza

Analýza inventarizácie životného cyklu (LCI) bola použitá na výpočet uhlíkovej stopy a ďalších environmentálnych indikátorov počas celého životného cyklu oboch navrhovaných scenárov rekonštrukcie základnej školy. Skladby stavebných konštrukcií (obvodového plášťa, strechy a otvorových konštrukcií) boli v oboch modeloch navrhnuté a optimalizované tak, aby po rekonštrukcii bezpečne spĺňali prísne tepelno-technické požiadavky na súčiniteľ prechodu tepla (U) a tepelný odpor (R) v zmysle normy STN 73 0540-2+Z1+Z2 [12] pre obnovu budov.

Architektonicko-konštrukčná a materiálová charakteristika pôvodného stavu objektu



Obr. 5.1 Základná škola - pohľad severozápadný



Obr. 5.2 Základná škola – pohľad severovýchodný

Podrobná analýza existujúceho stavebno-technického stavu budovy Základnej školy vychádza z projektovej dokumentácie zamerania pôvodného stavu a technických výpisov prvkov. Z hľadiska materiálovej kompozície a typológie konštrukcií vykazuje objekt znaky typizovanej výstavby školských budov druhej polovice 20. storočia, s aplikáciou masívnych silikátových materiálov a vtedajších štandardov tepelno-technickej ochrany.

Vertikálne nosné a výplňové konštrukcie

Nosný systém objektu je tvorený kombináciou masívnych murovaných konštrukcií, ktoré plnia statickú aj akumuláciu funkciu.

- Obvodový plášť: Primárnu obalovú konštrukciu tvoria obvodové steny z CDm tehál s hrúbkou 250-550 mm. Z hľadiska povrchových úprav sú steny opatrené tradičnou vápenno-cementovou omietkou s hrúbkou 20 mm z exteriérovej aj interiérovej strany. Zateplenie obvodovej steny je realizované EPS polystyrénom hrúbky 60-80 mm. Z hľadiska súčasných požiadaviek normy STN 73 0540-2+Z1+Z2 [12] vykazuje táto konštrukcia bez dodatočného zateplenia nedostatočný tepelný odpor (R) a vysoký súčiniteľ prechodu tepla (U).
- Vnútorne nosné steny a priečky: Vnútorňý trakt a deliace konštrukcie sú realizované z CDm tehál, murovaných na cementovú maltu. Vnútorne nosné steny majú hrúbku 375 mm (resp. 400 mm) a nenosné deliace priečky hrúbku 125-150 mm.

Horizontálne konštrukcie a stropné systémy

Konštrukčné riešenie stropov využíva prefabrikované komponenty, ktoré umožnili rýchlu realizáciu a prekonanie požadovaných rozponov učební.

- Stropná konštrukcia nad nadzemnými podlažiami: Stropný systém pozostáva z prefabrikovaných železobetónových dutinových panelov s konštrukčnou výškou 150 mm. Tieto panely sú uložené na nosnom murive prostredníctvom stužujúcich železobetónových vencov.

- Skladba podlahových vrstiev (interiér): Na nosnej konštrukcii panelov je realizovaný vyrovnávací betónový poter v hrúbke 60 mm. Finálnu nášľapnú vrstvu v komunikačných priestoroch a učebniach tvorí povlaková krytina na báze PVC (polyvinylchlorid) s hrúbkou 5 mm, fixovaná celoplošným lepením. Celková hrúbka stropnej konštrukcie vrátane podlahových vrstiev dosahuje 230 mm, pričom v tejto skladbe absenteuje účinná kročajová a tepelná izolácia.

Strešný plášť a strešná konštrukcia

Objekt je zastrešený plochou konštrukciou so spádom 8%, čo zodpovedalo vtedajším stavebným postupom pre občiansku vybavenosť.

- Nosná časť a spádovanie: Základ strechy tvorí stropná doska z dutinových železobetónových panelov hrúbky 150 mm. Na paneloch je aplikovaná spádová vrstva z betónovej zálievky, pre zaistenie odtoku zrážkových vôd do vnútorných strešných vpustov.
- Tepelnoizolačná a hydroizolačná vrstva: Pôvodná tepelná izolácia je realizovaná z dosiek zo sklenej vaty (minerálna vlna staršej produkcie) s celkovou hrúbkou iba 50 mm. Hydroizolačný systém je koncipovaný ako viacvrstvový, tvorený natavovanými asfaltovými pásmi (v celkovej hrúbke. Strecha je z vrchnej strany ešte zateplená PUR doskami a XPS tvrdým polystyrénom v hrúbke 150 mm. Celá skladba strešného plášťa vykazuje vysoký stupeň fyzickej degradácie a z hľadiska energetickej bilancie predstavuje veľký tepelný most.

Otvorové konštrukcie (Výplne otvorov)

- Fasádne okenné konštrukcie: Všetky okenné výplne na objekte sú plastové. Z hľadiska materiálového riešenia ide o PVC profily, ktoré sú osadené izolačným dvojsklom.
- Vstupné a interiérové dvere: Exteriérové vstupné dvere, ako aj nadväzujúce dverné konštrukcie v objekte, sú taktiež plastové. Využívajú zhodnú materiálovú bázu na báze PVC profilov s príslušnou výplňou.

Architektonicko-konštrukčná a materiálová charakteristika nového stavu objektu



Obr. 5.3 Základná škola – pohľad severozápadný



Obr. 5.4 Základná škola – pohľad severovýchodný

Zateplenie obvodového plášťa a základov (Systém ETICS)

Všetky nové zatepľovacie vrstvy sú navrhnuté s cieľom viditeľne zlepšiť tepelno-technické vlastnosti budovy.

- Zateplenie obvodovej steny: V novom návrhu sa použije nová tepelná izolácia z minerálnej vaty (tvrdé dosky) v hrúbke 160 mm, ktorá sa realizuje kontaktným zatepľovacím systémom ETICS. Okolo všetkých otvorových konštrukcií sa vytvoria ostenia z minerálnej tepelnej izolácie v hrúbke 30 mm (pre elimináciu tepelných mostov).
- Zateplenie základov a sokla: Použije sa nová tepelná izolácia z XPS (extrudovaný polystyrén) v hrúbke 100 mm, lepená systémom ETICS a zapustená až 500 mm pod úroveň terénu. S tým súvisia aj nové výkopy pre zateplenie základov s hĺbkou 500 mm pozdĺž objektu.

Výplne otvorov (Nové okná a dvere)

V rámci plánovanej obnovy budovy dôjde k výmene a osadeniu nových okenných a dverných konštrukcií, ktoré projekt presne špecifikuje podľa rozmerov a umiestnenia na jednotlivých podlažiach. Nové dverné konštrukcie sa sústreďujú predovšetkým na prvom nadzemnom podlaží, kde zabezpečia modernizáciu vstupných uzlov a prechodov.

Nová strešná konštrukcia a stropy

V novom návrhu sa počíta s kompletným odstránením pôvodných strešných vrstiev (vrátane štrkového zaťaženia) až po nosný ŽB stropný panel. Nová nadstavba strechy obsahuje:

- Nový Železobetónový (ŽB) veniec: Zrealizuje sa nový obvodový ŽB veniec s integrovanými pomúrniciami (rozmer 150 × 150 mm), ktorý sa osadí nad nosný systém stien a prievlakov.
- Nosná konštrukcia strechy: Bude tvorená novými drevenými väzníkmi.
- Strešný plášť a krytina: Nové plné debnenie z dosiek hrúbky 25 mm.
- Paropriepustná fólia (poistná hydroizolácia) so štruktúrovanou rohožou.
- Nová strešná krytina z poplastovaného falcovaného plechu s hrúbkou 0,5 mm.
- Doplnky: Nové klampiarske prvky (oplechovanie) a predĺženie všetkých vetracích potrubí nad úroveň novej strešnej roviny.

Nové technické a technologické miestnosti (1. NP)

V rámci dispozičných úprav na 1. nadzemnom podlaží vznikajú nové priestory pre technické zázemie a obnoviteľné zdroje energie:

- Miestnosť č. 1,22: Technická miestnosť.
- Miestnosť č. 1,23: Technická miestnosť pre fotovoltaiku.

V exteriéri sa taktiež pripravuje nový ŽB základový pás pre tepelné čerpadlo, ktorý bude vyhotovený minimálne 250 mm nad úrovňou upraveného terénu.

Tab. 5.1 Výmena materiálov oproti pôvodnému modelu

Model obvodovej steny	Skladba vrstiev (zvnútra von)	R [m ² ·K/W]	U [W/m ² ·K]
Pôvodná skladba	Vápenná omietka (15) + Keramická tehla (375) + Minerálna vlna (160) + Omietka	5,85	0,17
Model 1: Drevozvláknitý ETICS	Vápenná omietka (15) + Tehla (375) + Drevozvláknitá doska (200) + Silikátová omietka	6,65	0,15
Model 2: Prevetrávaná fasáda	Vápenná omietka (15) + Tehla (375) + Fúkané drevozvlákno (200) + Drevozvláknitá doska (60) + Vzduchová medzera (40) + Drevený obklad (20)	8,25	0,12
Model strechy	Skladba vrstiev (z interiéru von)	R [m ² ·K/W]	U [W/m ² ·K]
Pôvodný Projekt	SDK (12,5) + Parozábrana + Sklená vlna (200) + Debnenie (25) + Falcovaný plech	5,35	0,19
Model 1: Fúkané drevozvlákno	SDK (12,5) + Parozábrana + Fúkané drevozvlákno (400) + Debnenie (25) + Falcovaný plech	10,25	0,1
Model 2: Fúkaná celulóza	SDK (12,5) + Parozábrana + Fúkaná celulóza (400) + Debnenie (25) + Falcovaný plech	10,75	0,09

5.2. Analýza vplyvov na životné prostredie

V rámci fázy hodnotenia vplyvov na životné prostredie (LCIA) boli vyhodnotené všetky inventarizačné dáta zhromaždené pre dva navrhované modely komplexnej obnovy budovy základnej školy. Zvolený prístup LCA posudzoval viaceré kategórie environmentálnych vplyvov v prísnom súlade s európskou normou EN 15804+A2. Prehľad hodnotených kategórií vplyvov je uvedený v tabuľke 2. Tieto kategórie boli na účely podrobnejšej interpretácie rozdelené na globálne, regionálne a lokálne.

Tab. 5.2 Parametre popisujúce základné vplyvy na životné prostredie

Kategória vplyvu	Skratka	Jednotka
Potenciál globálneho otepľovania – celkový	GWP-celkový	kg CO _{2e}
Potenciál globálneho otepľovania – fosílny	GWP-fosílny	kg CO _{2e}
Potenciál globálneho otepľovania – biogénny	GWP-biogénny	kg CO _{2e bio}
Potenciál globálneho otepľovania – využitie krajiny a zmena využitia krajiny	GWP-LULUC	kg CO _{2e}
Potenciál úbytku stratosférickej ozónovej vrstvy	ODP	kg CFC 11 e
Potenciál acidifikácie (okysľovania) pôdy a vody	AP	mol H ⁺ e.
Potenciál eutrofizácie pre sladkovodné prostredie	EP-AF	kg P e
Potenciál eutrofizácie pre morské prostredie	EP-AM	kg N e
Potenciál terestrickej (suchozemskej) eutrofizácie	EP-T	mol N e
Potenciál tvorby troposférického ozónu	POCP	kg NMVOC e
Potenciál úbytku abiotických surovín pre nefosílny zdroje	ADP-E	kg Sb e
Potenciál úbytku abiotických surovín pre fosílny zdroje	ADP-FF	MJ
Potenciál nedostatku vody	WD	m ³

5.2.1 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Pôvodný stav)

Prehľadná kvantitatívna analýza životného cyklu (LCA) odhaľuje distribúciu environmentálnej záťaže v jednotlivých fázach. Hodnotenú sú primárne kategórie vplyvu: GWP, AP, EP, POCP a ADP.

Globálne ukazovatele

Indikátor GWP vyjadruje celkovú produkciu skleníkových plynov prepočítanú na ekvivalent oxidu uhličitého ($\text{kg CO}_2\text{e/m}^2$). V pôvodnom stave budovy je celková uhlíková stopa extrémne vysoká a jej distribúcia jasne definuje problematické fázy. Výsledky na 1m^2 podlahovej plochy poskytujú presnejší pohľad na intenzitu skleníkových efektov v jednotlivých etapách životného cyklu Základnej školy.

Z hľadiska globálneho potenciálu otepľovania (GWP-celkový) vyjadreného v merných jednotkách $\text{kg CO}_2\text{e/m}^2$ vykazuje pôvodný stav budovy Základnej školy výraznú environmentálnu záťaž, ktorej absolútnou dominantou je prevádzková fáza. Modul prevádzkovej energie B6, zahŕňajúci spotrebu energie na vykurovanie a prevádzku, generuje kritických $1\,391,74\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. Druhým najvýznamnejším príspevkom je fáza výroby stavebných materiálov (Moduly A1–A3) so zabudovanou uhlíkovou stopou na úrovni $782,29\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. Procesy spojené s výstavbou a inštaláciou (Modul A5) prispievajú hodnotou $122,14\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$, kde najväčší podiel tvorí materiálové plytvanie na stavenisku ($64,42\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$) a samotná prevádzka staveniska ($49,77\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$). Priebežná obnova a údržba materiálov počas životného cyklu (Moduly B4–B5) zodpovedá hodnote $39,32\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$ a preprava materiálov na stavenisko (Modul A4) pridáva $25,06\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. Fáza konca životnosti objektu (Moduly C1–C4), ktorá zahŕňa dekonštrukciu, transport a spracovanie odpadu, predstavuje zaťaženie $33,48\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. Mimoriadne dôležitý je však potenciálny prínos recyklácie a opätovného použitia konštrukcií mimo hraníc systému (Modul D), ktorý vykazuje úsporu až $-514,93\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$, čo potvrdzuje vysokú environmentálnu hodnotu zachovania a zhodnotenia pôvodnej materiálovej bázy pri plánovanej obnove. V nadväznosti na globálny potenciál otepľovania (GWP-celkový) poskytuje detailnejšia segmentácia emisií na fosílnu zložku (GWP-fosílny), biogénnu zložku (GWP-biogénny) a emisie spojené s využívaním krajiny a jej zmenami (GWP-LULUC) prepočítanej na FU podlahovej plochy. Dominantným faktorom sú fosílné emisie (GWP-fosílny), ktoré v operačnej fáze spotreby energie (Modul B6) dosahujú kritických $1\,397,15\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. Druhý najvýznamnejší príspevok fosílnych emisií pochádza z výrobných fáz stavebných materiálov (Moduly A1–A3) na úrovni $801,34\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$ a z realizačnej fázy výstavby (Modul A5) vo výške $117,49\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. Pri biogénnych emisiách (GWP-biogénny), ktoré reflektujú uhlík viazaný v materiáloch na báze biomasy (napr. drevo), vykazuje fáza materiálov (A1–A3) negatívnu hodnotu $-15,67\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. Tento stav indikuje, že pôvodné prírodné materiály v sebe absorbovali a dočasne uložili atmosférický uhlík. Naopak, vo fáze konca životnosti (Moduly C1–C4) sa tento biogénny uhlík uvoľňuje späť do prostredia, čo predstavuje nárast o $11,13\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$, pričom k uvoľneniu dochádza aj počas realizačnej fázy staveniska (Modul A5) na úrovni $4,61\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. Posledná zložka, emisie GWP-LULUC (spojené s využívaním pôdy, zmenami v užívaní pôdy a lesníctvom), vykazuje v celom životnom cykle budovy minimálny, takmer zanedbateľný vplyv. Najvyššiu, avšak stále nízku úroveň dosahuje vo výrobných fázach materiálov A1–A3 s hodnotou $0,62\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$ a v prevádzkovom module B6 na úrovni $0,59\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$. Z hľadiska materiálového zhodnotenia a úspor mimo hraníc systému (Modul D) analýza poukazuje na významný potenciál úspory fosílnych emisií vo výške $-514,58\text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$, zatiaľ čo biogénna zložka a zložka LULUC vykazujú v tomto module nulové alebo úplne minimálne hodnoty. Z hľadiska indikátora abiotického vyčerpania nerastných surovín a neobnoviteľných prvkov (ADP-E), vykazuje životný cyklus pôvodného stavu budovy Základnej školy špecifickú distribúciu záťaže, kde na rozdiel od emisií skleníkových plynov v GWP nedominuje prevádzková fáza. Absolútne najvyšší príspevok k vyčerpaniu prvkov vykazuje fáza prepravy materiálov na stavenisko (Modul A4), ktorá dosahuje hodnotu $0,134\text{ kg Sbe/m}^2$.

Druhým najvýznamnejším faktorom je fáza konca životnosti (Moduly C1–C4) s úhrnným dopadom 0,092 kg Sbe/m², pričom v rámci nej je spotreba prvkov viazaná takmer výhradne na modul prepravy stavebného odpadu C2, ktorý generuje 0,091 kg Sbe/m². Samotná výrobná fáza stavebných materiálov (Moduly A1–A3) prispieva k abiotickému vyčerpaniu hodnotou 0,047 kg Sbe/m². Priebežná obnova a výmena stavebných komponentov počas životného cyklu (Moduly B4–B5) sa na indikátore podieľa hodnotou 0,018 kg Sbe/m². Naopak, fáza spotreby energie (Modul B6) vykazuje v tejto kategórii vplyvu minimálny, takmer zanedbateľný dopad na úrovni 0,0026 kg Sbe/m².

Regionálne ukazovatele

Pri hodnotení regionálnych environmentálnych ukazovateľov pôvodného stavu budovy Základnej školy sa prejavuje vplyv medzi fázou výroby stavebných materiálov a operačnou fázou budovy, zatiaľ čo vplyv logistiky a konca životnosti zostáva v mieste stavby je druhoradý. V kategórii AP dominuje výrobná fáza materiálov (Moduly A1–A3) s hodnotou 1,85 mol H⁺ eq./m², ktorú nasleduje prevádzková spotreba energie (Modul B6) s hodnotou 1,75 mol H⁺ eq./m². Pri analýze eutrofizácie dochádza k diferenciácii vplyvov podľa typu zasiahnutého biotopu: kým EP-AF je ovplyvnená takmer výhradne materiálmi A1–A3 s hodnotou 0,037 kg P eq./m² oproti prevádzkovým 0,016 kg P eq./m² a EP-AM vykazuje rovnaký trend s maximom v module materiálov na úrovni 0,328 kg N eq./m², pri EP-T preberá hlavnú zodpovednosť prevádzková fáza B6 s hodnotou 3,49 mol N eq./m² pred fázou materiálov s 2,97 mol N eq./m², čo je priamym dôsledkom dlhodobých emisií zo spaľovania palív pri vykurovaní objektu. Fáza konca životnosti (Moduly C1–C4) zaťažuje lokálne ekosystémy len minimálne. Potenciál okysľovania (AP) tu predstavuje iba 0,08 mol H⁺ eq./m² a nízke hodnoty dosahujú aj indikátory eutrofizácie. Úplne iný pohľad však prináša hodnotenie prínosov a úspor v Module D. Ukazuje, že ak by sa pôvodné konštrukcie po dekonštrukcii zhodnotili, krajine by sa hypoteticky vrátil významný environmentálny dlh. Pri acidifikácii by táto úspora predstavovala -1,95 mol N eq./m² a pri terestriálnej eutrofizácii až -4,65 mol N eq./m².

Lokálne ukazovatele

Pri analýze neobnoviteľných energetických zdrojov a celkového vplyvu na hydrosféru vykazuje životný cyklus pôvodného stavu budovy veľkú závislosť od energetických vstupov v prevádzke. V rámci ADP-FF dominuje prevádzková fáza B6 s hodnotou 19 547,06 MJ/m², čo odzrkadľuje neefektívne nakladanie s energiou pred obnovou. Druhým najväčším spotrebiteľom fosílnych zdrojov je výrobná fáza stavebných materiálov (Moduly A1–A3) na úrovni 6 257,67 MJ/m², zatiaľ čo samotná realizácia stavby (Modul A5) si vyžiadala 1 228,24 MJ/m². Identický trend dominancie prevádzkového modulu B6 sa prejavuje aj pri indikátore spotreby vody WU, kde nepriamy odber viazaný na energetické procesy dosahuje masívnych 21 734,11 m³/m². Spotreba vody vo výrobnej fáze materiálov A1–A3 predstavuje druhotnú záťaž vo výške 1 901,87 m³/m² a priebežná obnova komponentov (Moduly B4–B5) odčerpá ďalších 518,24 m³/m². Priamy odber vody počas prevádzky školy žiakmi a personálom (Modul B7) má na celkový cyklus minimálny dopad s hodnotou iba 8,23 m³/m². Fáza konca životnosti (Moduly C1–C4) zaťažuje oba indikátory zanedbateľne (451,29 MJ/m² a 5,48 m³/m²). Z hľadiska materiálových úspor mimo hraníc systému (Modul D) však analýza preukazuje obrovský potenciál; zhodnotenie pôvodnej konštrukčnej bázy dokáže kompenzovať prostrediu až -6 775,30 MJ/m² fosílnu energiu a -545,49 m³/m² spotrebovanej vody.

5.2.2 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Scenár 1)

Globálne ukazovatele

V dekarbonizačnom scenári (Scenár 1) dochádza k zásadnému presunu a redukcii emisií skleníkových plynov, kde sa naplno prejavuje efekt energetickej obnovy budovy. GWP-celkový v prevádzkovej fáze spotreby energie (Modul B6) klesol vďaka zatepleniu a novým technológiám na hodnotu 739,99 kg CO_{2e}/m². Z hľadiska detailnejšej segmentácie GWP tvoria najväčšiu zložku fosílna emisie (GWP-fosílny), ktoré v module prevádzkovej energie B6 dosahujú 1397,15 kg CO_{2e}/m². Druhým najvýznamnejším príspevkom fosílnych emisií je výrobná fáza nových stavebných materiálov (Moduly A1–A3) s hodnotou 777,38 kg CO_{2e}/m², nasledovaná fázou samotnej realizácie a procesov na stavenisku (Modul A5) na úrovni 115,58 kg CO_{2e}/m².

Pri biogénnych emisiách (GWP-biogénny), ktoré reflektujú uhlík viazaný v materiáloch na báze biomasy, vykazuje fáza materiálov A1–A3 negatívnu hodnotu -38,02 kg CO_{2e bio}/m², čo znamená úspešné dočasné uloženie atmosférického uhlíka v nových konštrukčných prvkoch. Tento biogénny uhlík sa následne uvoľňuje na konci životnosti (Moduly C1–C4) s nárastom o 35,75 kg CO_{2e bio}/m² a čiastočne počas stavebných procesov v module A5 na úrovni 1,78 kg CO_{2e bio}/m².

Emisie GWP-LULUC (spojené s využívaním pôdy), vykazuje v tomto scenári zanedbateľný vplyv. Najvyššiu úroveň dosahuje vo výrobnej fáze materiálov A1–A3 s hodnotou 0,64 kg CO_{2e}/m² a v prevádzkovom module B6 na úrovni 0,59 kg CO_{2e}/m². Z hľadiska materiálového zhodnotenia a úspor za hranicami systému (Modul D) vykazuje dekarbonizačný scenár dodatočný pozitívny prínos vo forme kompenzácie fosílnych emisií na úrovni -515,18 kg CO_{2e}/m².

Regionálne ukazovatele

Celkové regionálne vyhodnotenie LCA pre Scenár 1 základnej školy potvrdzuje, že navrhované opatrenia majú pre životné prostredie jednoznačne pozitívny prínos, čo dokazujú výsledné záporné hodnoty čistej bilancie vo všetkých sledovaných kategóriách. Počas životného cyklu sa v projekte objavujú dva zásadné kritické body, ktoré predstavujú najväčšiu záťaž – najmä v kategórii EP-T (hodnoty vo fáze A1-A3 3,42 mol N eq./m² a B6 2,97 mol N eq./m²) a AP (hodnoty vo fáze A1-A3 1,73 mol H⁺ eq./m² a B6 1,75 mol H⁺ eq./m²), čo zodpovedá fáze výroby a inštalácie nových izolačných materiálov alebo technológií. Napriek tejto počiatkovej investícii do znečistenia však prevádzková fáza dekarbonizovanej školy dokáže tieto vplyvy kompletne kompenzovať. Významné zníženie zaznamenal aj AP (-1,96 mol H⁺ eq./m²), ktorý minimalizuje riziko kyslých dažďov. Vplyvy na vodné ekosystémy (EP-AF -0,21 kg Pe eq./m² a EP-AM -0,46 kg N eq./m²) vykazujú síce menšie, no stále stabilné ekologické úspory. Z hľadiska komplexného posúdenia životného cyklu je teda tento dekarbonizačný Scenár 1 vysoko efektívny, udržateľný a pre daný región prínosný. Ukazovateľ POCP v Scenári 1 odzrkadľuje schopnosť projektu znížiť znečistenie ovzdušia spôsobujúce letný fotochemický smog v regióne. Hoci samotná realizácia dekarbonizácie prináša do ovzdušia emisie z dopravy a stavebnej chémie, výsledná bilancia -2,23 kg NMVOC eq./m² potvrdzuje vysokú environmentálnu efektivitu. Vďaka zníženiu energetickej náročnosti školy sa v dlhodobom horizonte predíde veľkej produkcii oxidov dusíka a prchavých látok, čo pre blízke okolie základnej školy znamená čistejšie a zdravšie ovzdušie s nižším rizikom tvorby prízemného ozónu.

Lokálne ukazovatele

Lokálne ukazovatele ADP-FF a WU odhaľujú, že Scenár 1 hodnotenej základnej školy si vyžaduje väčšiu počiatočnú investíciu do prírodných zdrojov. Hlavným kritickým bodom celého životného cyklu je veľká záťaž v podobe spotreby fosílnych palív ($19\,649,03\text{ MJ/m}^2$) a vody ($21847,52\text{ m}^3/\text{m}^2$), čo v praxi reprezentuje energeticky a surovinovo náročnú priemyselnú výrobu moderných izolačných materiálov či ekologických technológií. Hoci následná prevádzka dekarbonizovanej školy prináša nepopierateľné úspory a generuje dôležité environmentálne kredity s čistým prevádzkovým prínosom $-6825,71\text{ MJ/m}^2$ (ADP-FF) a $-669,09\text{ m}^3/\text{m}^2$ (WD). Tieto úspory nedokážu v sledovanom cykle plne vykompenzovať vysoké vstupné náklady na samotnú realizáciu. Celková bilancia oboch ukazovateľov tak zostáva v kladných číslach. Z pohľadu spotreby prvotných zdrojov a vody teda tento dekarbonizačný scenár predstavuje výrazný lokálny nárok na ekosystémy a suroviny, ktorý je však protihodnotou za globálne a regionálne benefity v iných kategóriách, ako je zníženie smogu či acidifikácie.

5.2.3 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Scenár 2)

Globálne ukazovatele

Celková bilancia Modelu 2 dosahuje hodnotu $2410\text{ kg CO}_{2e}/\text{m}^2$. Najvýraznejším prispievateľom je prevádzková energia (modul B6) s hodnotou $1400\text{ kg CO}_{2e}/\text{m}^2$, čo zdôrazňuje dôležitosť znižovania energetickej náročnosti školy počas užívania. Výrobná fáza materiálov (A1–A3) produkuje $733\text{ kg CO}_{2e}/\text{m}^2$. Zásadným benefitom Modelu 2 je integrácia bio-materiálov vo výrobnnej fáze (A1–A3), kde dochádza k negatívnej bilancii emisií na úrovni $-50,6\text{ kg CO}_{2e\text{ bio}}/\text{m}^2$. Tieto materiály na báze obnoviteľných zdrojov sú schopné dlhodobo viazať oxid uhličitý absorbovaný počas rastu biomasy. K uvoľneniu tohto uhlíka ($60,6\text{ kg CO}_{2e}/\text{m}^2$) dochádza až vo fáze konca životnosti (C1–C4) pri spracovaní odpadu. Vplyv zmien vo využívaní krajiny je minimálny, s celkovou hodnotou $1,51\text{ kg CO}_{2e}/\text{m}^2$, pričom najväčší podiel pripadá na výrobnú fázu ($0,634\text{ kg CO}_{2e}/\text{m}^2$) a prevádzkovú energiu ($0,593\text{ kg CO}_{2e}/\text{m}^2$). Celkový potenciál úbytku ozónu (ODP) je zanedbateľný a dosahuje $0,00016\text{ kg CO}_{2e}/\text{m}^2$, pričom dominantným zdrojom je prevádzková energia v module B6 ($0,000135\text{ kg CO}_{2e}/\text{m}^2$). Ukazovateľ ADP-E dosahuje $0,314\text{ kg Sb eq.}/\text{m}^2$. Najvyššiu záťaž predstavuje doprava materiálov na stavenisko v module A4 ($0,134\text{ kg Sb eq.}/\text{m}^2$).

Regionálne ukazovatele

Celková hodnota AP dosahuje $4,18\text{ mol H}^+\text{ eq.}/\text{m}^2$. Hlavnými emisnými fázami sú výroba materiálov (A1-A3: $1,76\text{ mol H}^+\text{ eq.}/\text{m}^2$) a spotreba energie počas prevádzky školy (B6: $1,76\text{ mol H}^+\text{ eq.}/\text{m}^2$). Ukazovateľ EP-AF dosahuje úroveň $0,0738\text{ kg Pe eq.}/\text{m}^2$, pričom viac ako polovicu (51,7%) generuje samotná výroba stavebných materiálov ($0,0382\text{ kg Pe eq.}/\text{m}^2$). Celkový vplyv EP-AM predstavuje $0,796\text{ mol N eq.}/\text{m}^2$, kde najväčší podiel má výrobná fáza ($0,332\text{ mol N eq.}/\text{m}^2$) nasledovaná prevádzkovou energiou ($0,276\text{ mol N eq.}/\text{m}^2$). Ukazovateľ EP-T vykazuje celkovú hodnotu $8,22\text{ mol N eq.}/\text{m}^2$, s takmer rovnomerným príspevkom výroby materiálov ($3,50\text{ mol N eq.}/\text{m}^2$) a energetickej prevádzky budovy ($2,97\text{ mol N eq.}/\text{m}^2$). Potenciál fotochemickej tvorby ozónu (letný smog) dosahuje celkovo $3,03\text{ kg NMVOC eq.}/\text{m}^2$. Kľúčovými fázami sú opäť prevádzková energia ($1,36\text{ kg NMVOC eq.}/\text{m}^2$) a emisie z výrobných procesov materiálov ($1,33\text{ kg NMVOC eq.}/\text{m}^2$).

Lokálne ukazovatele

Spotreba fosílnych palív (APD-FF) predstavuje masívnych 28600 MJ/m². Tento ukazovateľ je dominantne poháňaný modulom B6 – prevádzkovou energiou (19600 MJ/m², t. j. 68,5%), čo reflektuje energetický mix spotrebovávaný budovou. Indikátor spotreby a nedostatku vody vykazuje celkovú hodnotu 24500 m³/m². Spotreba je takmer výlučne viazaná na prevádzku budovy (modul B6: 21800 m³/m²), zatiaľ čo samotná spotreba vody vo výrobnéj fáze A1–A3 predstavuje 2020 m³/m².

Vďaka vysokému zastúpeniu environmentálne vhodných materiálov a bio-izolácií v Modeli 2 dokáže táto rekonštrukcia vygenerovať úsporu až -568 kg CO_{2e}/m² v celkovom potenciáli globálneho otepľovania (GWP-celkový). Modul D rovnako prináša výrazné environmentálne úspory vo všetkých ostatných kategóriách, predovšetkým v úspore fosílnych surovín (-7 130 MJ/m²) a znížení acidifikácie (-2,07 mol H⁺ eq./m²). Tieto prínosy potvrdzujú, že investícia do dekarbonizovaných stavebných materiálov sa v plnej miere prejaví v synergii s cirkulárnou ekonomikou na konci životného cyklu budovy.

5.2.4 Vyhodnotenie rozdielov pôvodného stavu, scenára 1 a scenára 2

Z porovnania Pôvodného stavu a Scenára 1 vyplýva, že prevádzková fáza (B6), ktorá vyjadruje spotrebu energie na vykurovanie, chladenie či svietenie, zostala v oboch tabuľkách z hľadiska emisií absolútne identická (napr. GWP-celkový v sekcii B6 je v oboch prípadoch 1 397,74 kg CO_{2e}/m²). To znamená, že dekarbonizačný efekt v Scenári 1 nie je dosiahnutý znížením energetických nárokov priamo počas prevádzky v triedach, ale zmenami v materiálovom zložení konštrukcií a radikálnym zvýšením environmentálneho kreditu na konci životnosti (modul D).

V Scenári 1 klesla uhlíková stopa výroby materiálov zo 786,29 na 739,99 kg CO_{2e}/m². To predstavuje čistú úsporu 46,30 kg CO_{2e}/m² ešte pred samotným začiatkom stavebných prác, čo svedčí o výbere ekologickejších alternatív s nižšou zabudovanou uhlíkovou stopou. Vo fáze obnovy a opráv (B4-B5), naopak uhlíková stopa v Scenári 1 vzrástla z 39,32 kg CO_{2e}/m² na 58,81 kg CO_{2e}/m² (+19,49 kg CO_{2e}/m²), čo je prirodzeným dôsledkom investície do dodatočných stavebných úprav potrebných na dekarbonizáciu. Modul opätovného využitia a recyklácie (D) je najdôležitejší z hľadiska dekarbonizačného Scenára 1. Záporný kredit (environmentálny benefit za recykláciu a predídene emisie v budúcnosti) sa prehĺbil z pôvodných -514,92 kg CO_{2e}/m² na -531,01 kg CO_{2e}/m². Scenár 1 tak prináša dodatočný benefit vo výške -16,08 kg CO_{2e}/m² vďaka cirkulárnej ekonomike.

Na základe podrobnej komparatívnej LCA analýzy celého životného cyklu budovy základnej školy môžeme konštatovať, že Scenár 1 oproti Pôvodnému stavu predstavuje vysoko efektívnu a environmentálne udržateľnú alternatívu voči Pôvodnému stavu, pričom celkovú globálnu uhlíkovú stopu (GWP-celkový) znižuje o 41,62 ton CO_{2e}/m². Tento pozitívny dekarbonizačný efekt je primárne poháňaný dvoma faktormi: zásadným znížením zabudovaných emisií už vo fáze samotnej výroby stavebných materiálov (sekcia A1-A3), kde úspora dosahuje 46,301 ton CO_{2e}/m², a výrazným posilnením obehového hospodárstva v module D (potenciál opätovného využitia a recyklácie), ktorý prináša dodatočný ekologický benefit vo výške -16,084 ton CO_{2e}/m². Hoci si realizácia Scenára 1 vyžiadala daň v podobe mierneho nárastu emisií počas fáz údržby, opráv (B4-B5) a záverečnej dekonštrukcie (C1-C4), tento nárast bol kompletne absorbovaný dosiahnutými úsporami. Z hľadiska regionálnych vplyvov projekt exceluje v radikálnom znížení rizika letného smogu (POCP -2,23 kg NMVOC eq./m²) a potlačaní acidifikácie prostredia (AP -1,96 mol H⁺ eq./m²). Jedinou nevýhodou dekarbonizačných opatrení zostáva ich vysoká počiatočná náročnosť na lokálne zdroje, kde

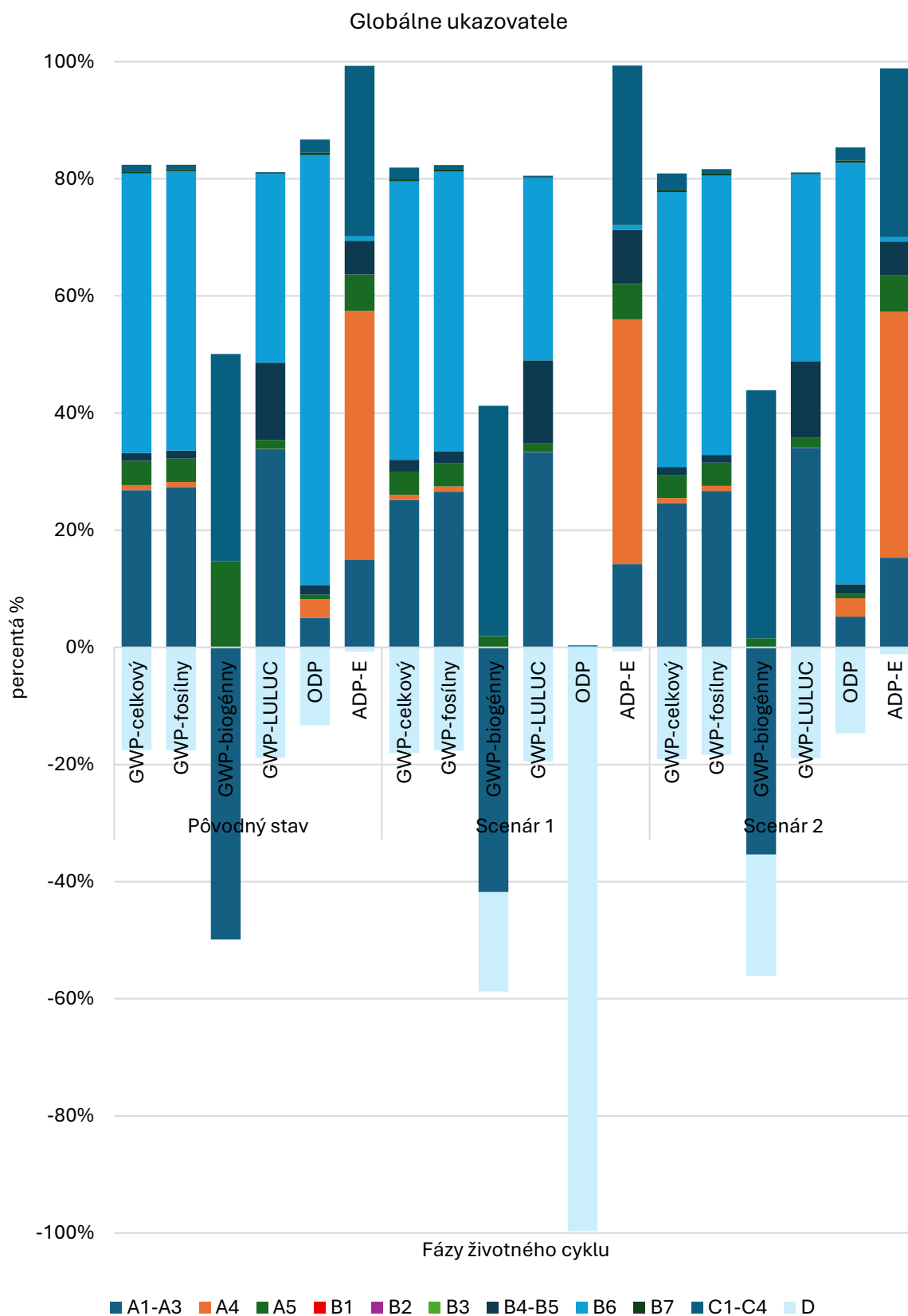
masívna priemyselná výroba nových technológií vyvoláva vysokú spotrebu fosílnych palív (ADP-FF) a vody (WU), ktorú následná prevádzka školy nedokáže v sledovanom čase plne vynulovať. Celkovo však Scenár 1 jednoznačne vyhráva, nakoľko táto počiatočná surovinová investícia prináša trvalé, komplexné a hmatateľné odľahčenie globálnej klímy a výrazné zlepšenie kvality životného prostredia v regióne školy. Zmena navrhnutá v Scenári 1 ovplyvnila dekarbonizáciu základnej školy jednoznačne pozitívne. Hoci si dekarbonizačné opatrenia vyžiadali o niečo vyššie emisie počas fáz údržby a obnovy (B4-B5) či likvidácie (C1-C4), tento nárast bol viac než bohato kompenzovaný vďaka ekologickejšej výrobe primárnych surovín (A1–A3) a podstatne vyššiemu recyklačnému potenciálu (D). Projekt ako celok tak úspešne znižuje globálne klimatické zaťaženie o viac než 41 ton CO_{2e}/m² počas celého uvažovaného životného cyklu budovy.

Detailná materiálová analýza fázy produktu A1-A3 potvrdzuje, že hlavným pilierom úspešnej dekarbonizácie v Scenári 1 je cieľená substitúcia konvenčných izolačných materiálov za ekologické alternatívy na báze obnoviteľných zdrojov. Zatiaľ čo Pôvodný stav sa spoliehal na tradičné minerálne vlny a polystyrény (EPS/XPS), ktoré kvôli energeticky náročnej výrobe zaťažovali bilanciu desiatkami ton emisií skleníkových plynov. Tieto materiály vykazujú iba kladné hodnoty uhlíkovej stopy. Výroba týchto izolácií je energeticky náročná a generuje fosílné emisie. Scenár 1 integruje fúkané a doskové izolácie z drevných vlákien. Tieto nové materiály vykazujú vďaka viazaniu biogénneho uhlíka počas rastu biomasy záporné hodnoty globálneho otepľovania (GWP-celkový dosahuje pri kľúčových položkách hodnoty až -1,41E4 kg CO_{2e}), čím z konštrukcie školy vytvárajú permanentné úložisko uhlíka. Keďže ťažké konštrukčné prvky ako betóny, oceľ a okná zostali v oboch návrhoch nezmenené, výsledný pokles zabudovaných emisií v Scenári 1 je priamym dôsledkom tejto ekologickej optimalizácie izolačnej obálky, ktorá premieňa stavebný materiálový prúd z producenta emisií na aktívny nástroj ochrany klímy.

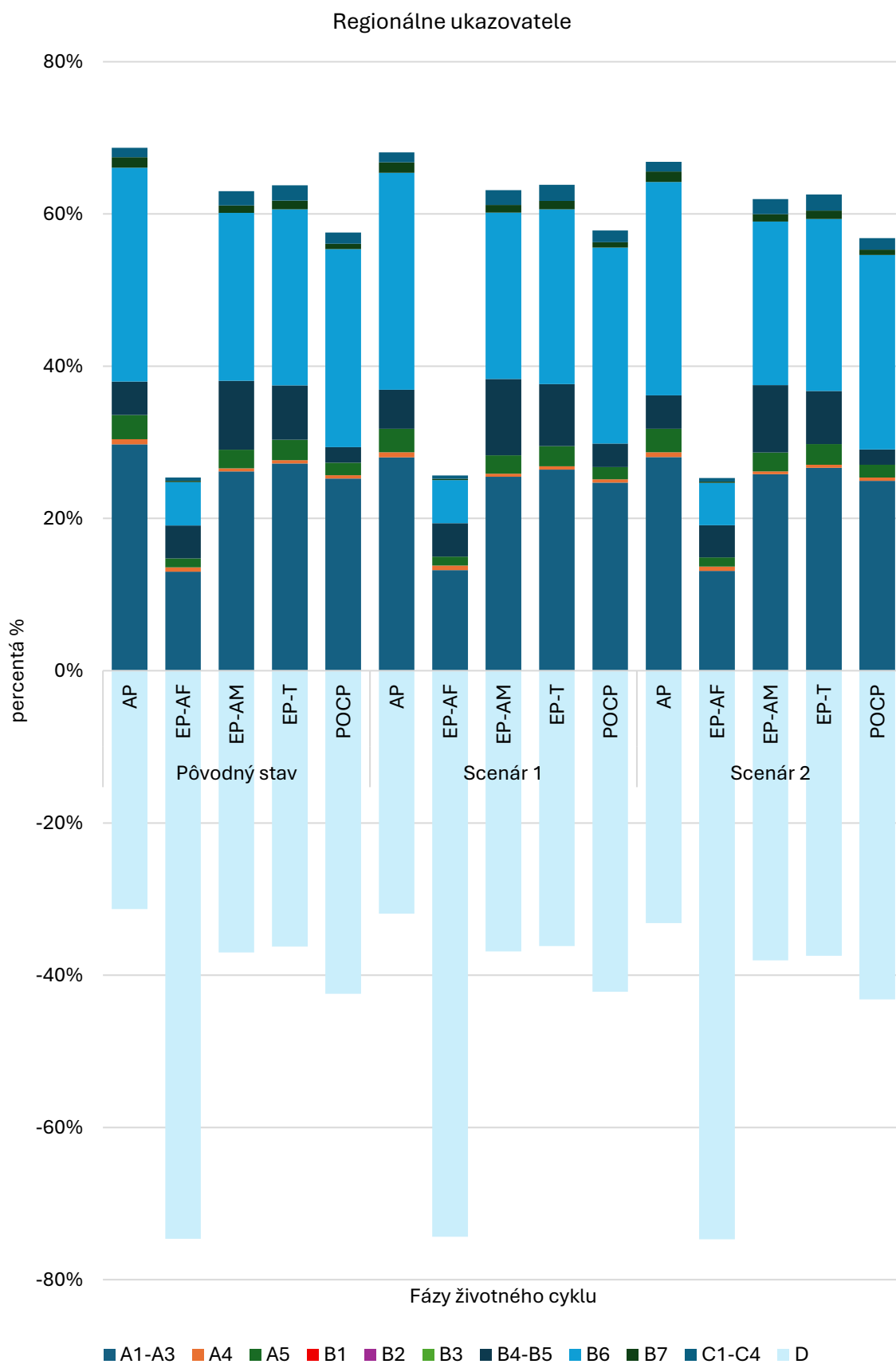
Z hľadiska samotnej dekarbonizácie a indikátorov GWP odhaľuje analýza Pôvodného stavu a Scenáru 2 najzásadnejšie rozdiely. V pôvodnom konvenčnom stave generuje samotná výroba stavebných materiálov (moduly A1-A3) celkovo 786,29 kg CO_{2e}/m². V Modeli 2 sa vďaka veľkému využitiu bio-materiálov podarilo túto hodnotu znížiť na 733,00 kg CO_{2e}/m², čo predstavuje priamu úsporu 6,8% zabudovaných emisií ešte pred samotným spustením prevádzky školy. Ešte výraznejší rozdiel vidíme v kategórii biogénneho otepľovania (GWP-biogénny). Kým Pôvodný stav vykazuje viazaný biogénny uhlík vo výrobnnej fáze na úrovni -15,67 kg CO_{2e}/m², Model 2 dosahuje zápornú hodnotu až -50,60 kg CO_{2e}/m². Ekologický variant tak dokáže v konštrukciách školy zakonzervovať 3,2-násobne viac atmosférického uhlíka absorbovaného počas rastu biomasy. K uvoľneniu tohto uhlíka (60,60 kg CO_{2e}/m²) dochádza v Modeli 2 až vo fáze konca životnosti (C1-C4) pri spracovaní odpadu, čo je však bohato kompenzované následnými kreditmi. V celkovom sumáre celého životného cyklu vrátane modulu D tak Model 2 prináša čistú úsporu vyše 59 kg CO_{2e}/m² oproti Pôvodnému stavu.

Pri hodnotení širších environmentálnych vplyvov na regionálnej a lokálnej úrovni vykazuje Model 2 konzistentne priaznivejšie parametre. V oblasti acidifikácie pôdy a vôd (AP) došlo vo výrobnnej fáze k poklesu z pôvodných 1,86 mol H⁺ eq./m² na 1,76 mol H⁺ eq./m² v prospech Modelu 2. Podobný stabilný či mierne klesajúci trend vykazujú aj hodnoty EP-T a EP-AM. V kategórii tvorby letného smogu (POCP) dokáže materiálové zloženie Modelu 2 udržať emisie z výrobných procesov na takmer identickej úrovni s konvenčným modelom (1,33 kg NMVOC eq./m²), no s výrazne lepším východiskovým bodom pre fázu recyklácie. Kľúčovým zistením

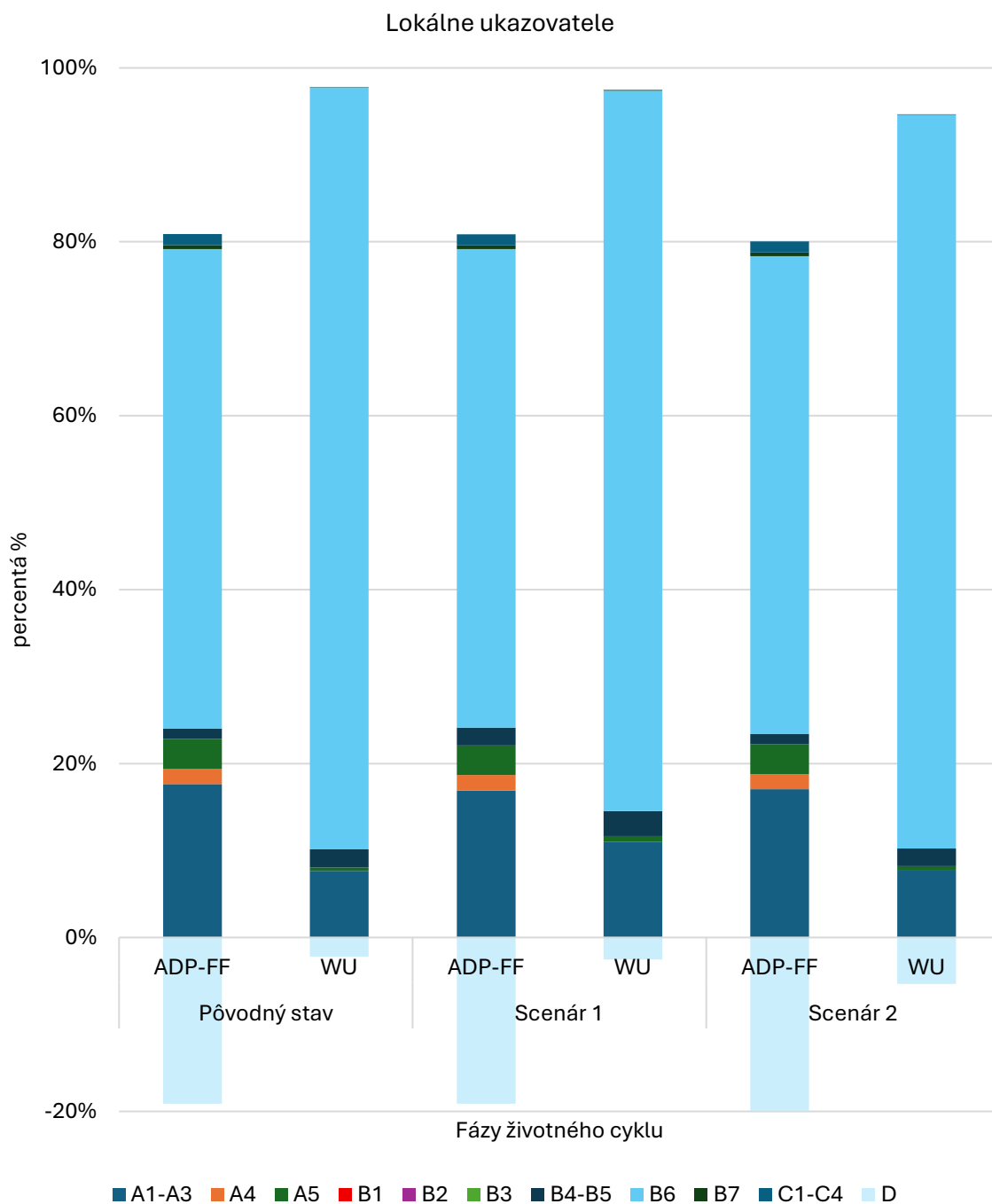
je tiež zníženie spotreby primárnych fosílnych zdrojov (ADP-FF) vo výrobnnej fáze z pôvodných 6290,32 MJ/m² na 6100,00 MJ/m² v Modeli 2. Tento výsledok exaktne potvrdzuje, že integrácia bio-materiálov efektívne nahrádza stavebné produkty závislé od ropného priemyslu a znižuje celkovú surovinovú náročnosť obnovy. Najvýznamnejší obrat v prospech udržateľnej architektúry a cirkulárnej ekonomiky však odhaľuje porovnanie modulu D, ktorý kvantifikuje čisté prínosy a kredity mimo hraníc systému po ukončení životnosti budovy. Kým konvenčné materiály pôvodného stavu dokážu na konci cyklu vrátiť do systému ekologický kredit vo výške -514,93 kg CO_{2e}/m², materiálová štruktúra Modelu 2 generuje úsporu emisií až -568 kg CO_{2e}/m², čo predstavuje viac než 10% nárast dekarbonizačnej efektívnosti v záverečnej fáze. Tento trend kopíruje aj úspora fosílnej energie v module D, kde Model 2 vracia do systému o 319 MJ/m² viac energie prostredníctvom budúcej recyklácie. Najväčší rozdiel sa prejavuje v indikátore nedostatku vody (WU), kde modul D v Modeli 2 vykazuje benefit -13 800 m³/m² oproti iba -548,33 m³/m² pri pôvodnom stave, čo podčiarkuje minimálnu ekologickú záťaž biologicky odbúrateľných materiálov.



Obr. 5.5 Výsledky globálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy



Obr. 5.6 Výsledky regionálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy



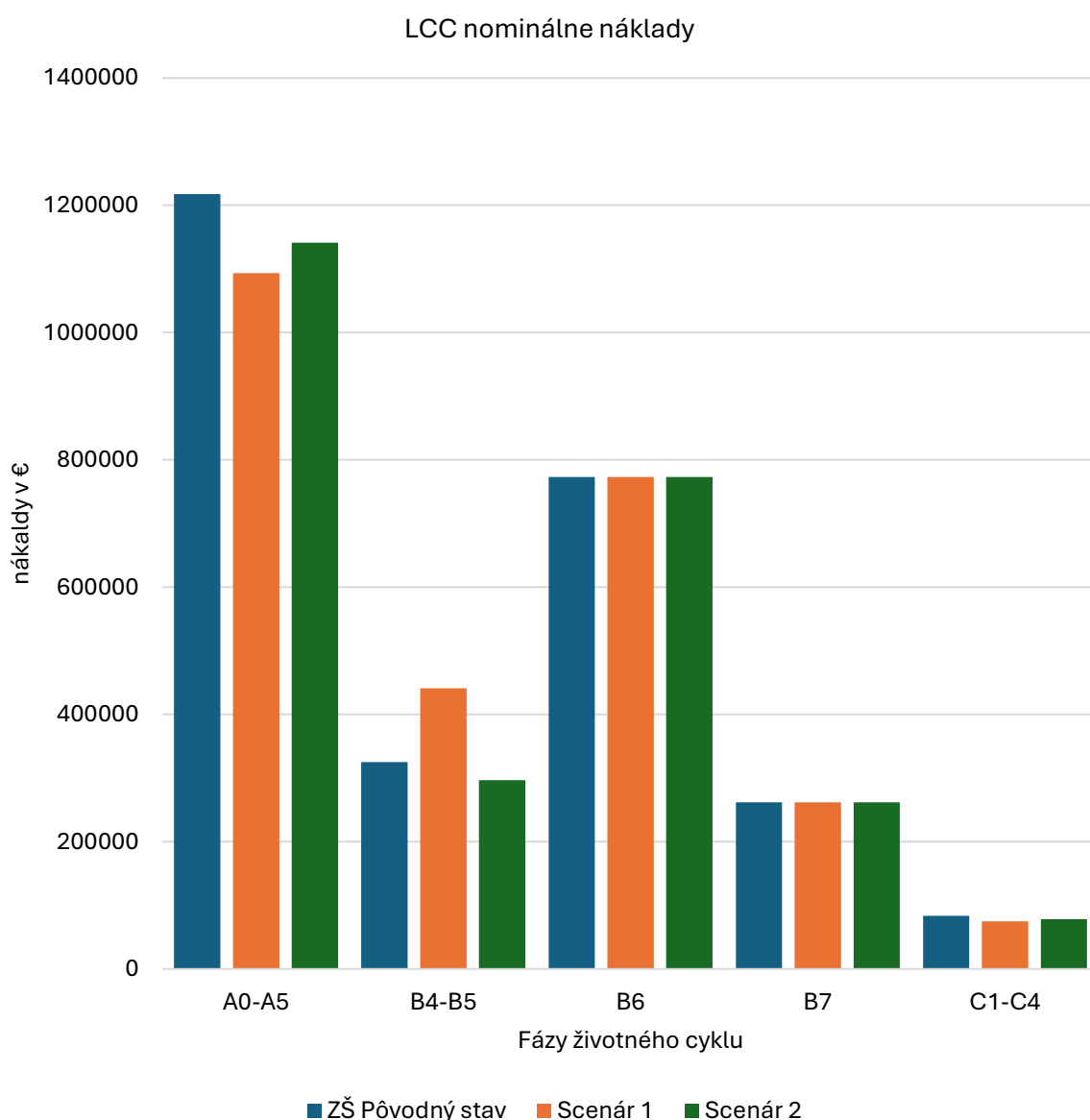
Obr. 5.7 Výsledky lokálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy

5.2.5 Vyhodnotenie nákladov na životný cyklus

Ekonómická časť udržateľnej obnovy budovy základnej školy bola posúdená prostredníctvom analýzy nákladov na životný cyklus (LCC) v súlade s normami ISO 15686-5 a EN 16627. Hodnotenie zohľadňuje nominálne, nediskontované náklady vrátane započítanej inflácie, pričom porovnáva pôvodný stav budovy s dvoma alternatívnymi scenármi rekonštrukcie. Celkové finančné zaťaženie je sledované naprieč všetkými kľúčovými fázami životného cyklu

od počiatočnej realizácie až po koniec životnosti (fázy A0 až C4) počas predpokladaného 50-ročného obdobia.

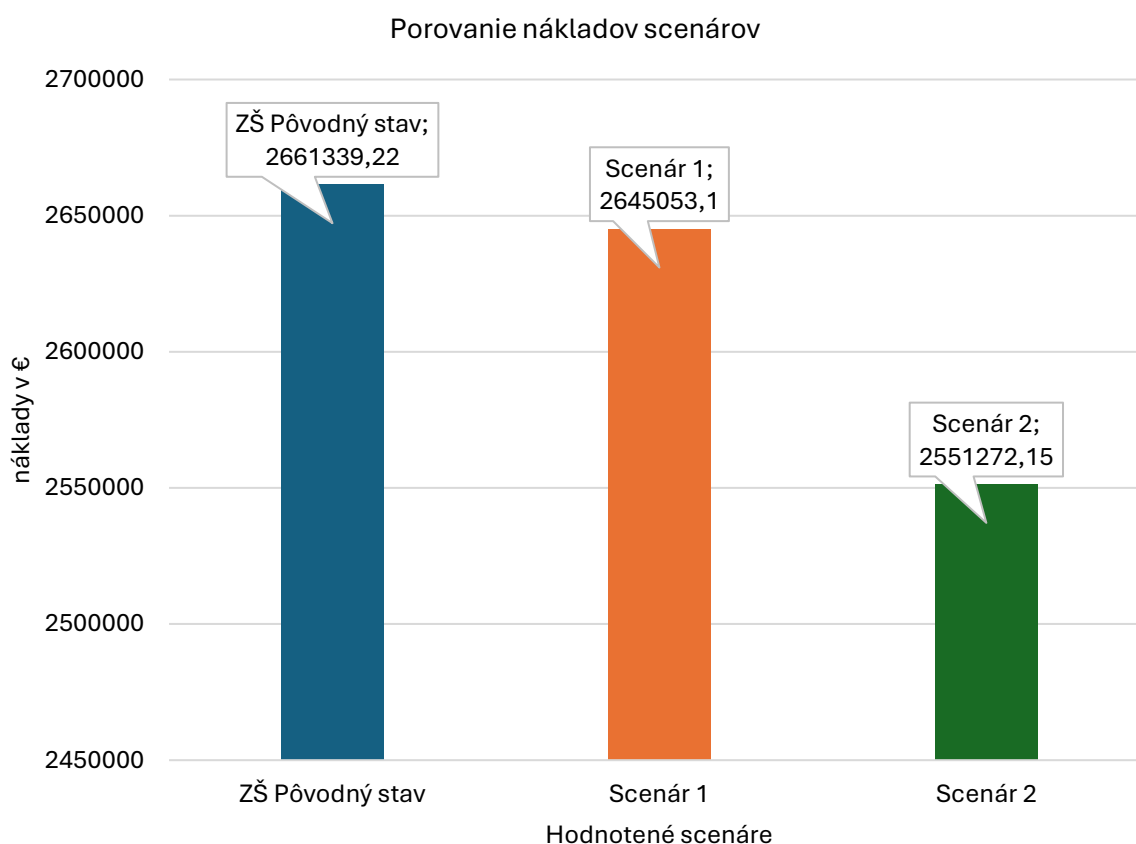
Pri analýze počiatočných investičných nákladov na výstavbu a realizáciu (moduly A0-A5) vykazuje najvyššie finančné zaťaženie pôvodný stav základnej školy bez dekarbonizačného efektu dosiahli hodnotu 1 217 541 €. Implementáciou konvenčného dekarbonizačného riešenia v rámci Scenára 1 klesajú počiatočné stavebné náklady na úroveň 1 093 523 €, zatiaľ čo progresívny, ekologickejší orientovaný Scenár 2 vyžaduje počiatočnú investíciu vo výške 1 141 129 €. Mierny nárast obstarávacích nákladov v Scenári 2 o približne 4,3 % v porovnaní so Scenárom 1 priamo odzrkadľuje vyššiu trhovú cenu inovatívnych a udržateľných izolačných materiálov na báze bio-materiálov.



Obr. 5.8 Výsledky LCC pre analyzované scenáre základnej školy

Zásadný ekonomický obrat a finančnú opodstatnenosť ekologického prístupu však odhaľuje fáza užívania budovy, konkrétne náklady na budúcu výmenu a obnovu stavebných komponentov po uplynutí ich životnosti (moduly B4-B5). V tejto kategórii vykazuje Scenár 2

najnižšie finančné zaťaženie zo všetkých troch posudzovaných stavov, a to na úrovni iba 296 705,50 €. V porovnaní s konvenčným Scenárom 1, kde náklady na cyklickú obnovu dosahujú až 441 360,57 €, predstavuje Scenár 2 veľkú úsporu vo výške 144 655,07 €. Na porovnanie, v pôvodnom stave by si údržba vyžiadala 325 114,94 €. Tento výsledok jednoznačne dokazuje, že integrované bio-materiály a navrhnuté konštrukčné skladby v Scenári 2 vykazujú vysokú dlhodobú stabilitu a podstatne nižšie nároky na periodickú údržbu či výmenu počas 50-ročnej prevádzky školy. Pre úplnosť je potrebné uviesť, že náklady na prevádzkovú energiu (B6: 773 204,01 €) a prevádzkovú spotrebu vody (B7: 261 895,91 €) sú vo všetkých troch prípadoch rovnaké, čo potvrdzuje, že oba rekonštrukčné scenáre dosahujú identickú úroveň energetickej hospodárnosti. V záverečnej fáze konca životnosti budovy (moduly C1-C4), ktorá zahŕňa dekonštrukciu, dopravu a odstránenie stavebného odpadu, sa finančné náklady medzi jednotlivými prístupmi líšia len minimálne. Najvyššie náklady na likvidáciu vykazuje pôvodný stav (83 583,36 €), nasledovaný Scenárom 2 s hodnotou 78 337,73 € a Scenárom 1 s najnižšími nákladmi na úrovni 75 069,61 €. Mierne zvýšené náklady na dekonštrukciu Scenáru 2 oproti Scenáru 1 súvisia so špecifickými postupmi selektívnej demontáže a triedenia bio-materiálov, ktoré sú však nevyhnutné pre ich následné environmentálne a energetické zhodnotenie v cirkulárnej ekonomike. V celkovom finančnom zhodnotení životného cyklu sa Scenár 2 prejavuje ako ekonomicky optimálnejšie a najefektívnejšia investičná stratégia pre verejný sektor. Hoci si realizácia ekologického variantu s nízkou uhlíkovou stopou vyžaduje o niečo vyššie vstupné náklady, táto počiatočná investícia je v priebehu životnosti budovy bohato kompenzovaná dramatickým znížením výdavkov na údržbu a výmeny v dlhodobom horizonte.



Obr. 5.9 Výsledky celkových nákladov pre analyzované scenáre základnej školy

5.2.6 Výsledky, diskusia a komplexné zhodnotenie scenárov

Záverečné porovnanie oboch modelov v rámci dekarbonizácie potvrdzuje, že hoci obidva prístupy radikálne a zhodne znižujú prevádzkovú náročnosť školy (moduly B6 a B7), Model 2 dosahuje signifikantne vyššiu úroveň environmentálnej excelentnosti v oblasti viazaného uhlíka. Použitie progresívnych bio-izolácií účinne tlmí negatívne dopady výroby, ukladá násobne viac skleníkových plynov priamo do telesa budovy a po skončení jej životnosti ponúka výrazne vyšší surovinový a recyklačný potenciál. Z hľadiska dlhodobých cieľov dekarbonizácie stavebného sektora na Slovensku sa preto implementácia postupov z Scenára 2 javí ako lepšie a perspektívne riešenie pre obnovu verejnej infraštruktúry.

Komplexné posúdenie dekarbonizačného, environmentálneho a ekonomického potenciálu obnovy budovy základnej školy prebiehalo formou komparácie troch základných stavov: pôvodného stavu objektu (ZŠ Pôvodný stav), Scenára 1 a 2, ktoré predstavuje obnovu pomocou integrácie bio-materiálov. Oba rekonštrukčné scenáre (Scenár 1 aj Scenár 2) boli navrhnuté a optimalizované tak, aby po stavebno-technickej stránke zhodne a znížili energetickú bilanciu objektu. Hlavný výskumný prínos preto spočíva v podrobnej analýze viazanej uhlíkovej stopy stavebných konštrukcií a v LCC počas predpokladaného 50-ročného hodnotiaceho obdobia. Z hľadiska dekarbonizácie a indikátorov GWP odhaľujú výsledky zásadné synergie medzi ekologickou voľbou materiálov a úsporou emisií skleníkových plynov. Vo výrobnnej fáze (moduly A1-A3) vykazuje konvenčný Scenár 1 emisie na úrovni 786,29 kg CO_{2e}/m². V Scenári 2 sa vďaka výmene prírodných izolácií na báze obnoviteľných zdrojov podarilo túto hodnotu znížiť na 733 kg CO_{2e}/m², čo predstavuje úsporu zabudovaného uhlíka o 6,8% ešte pred spustením samotnej prevádzky školy. Najvýraznejší environmentálny benefit Scenára 2 sa prejavuje v kategórii biogénneho otepľovania (GWP-biogénneho), kde fixácia atmosférického uhlíka v bio-materiáloch dosahuje zápornú hodnotu až -50,60 kg CO_{2e}/m², čo je viac než 3,2-násobný pokles v porovnaní s konvenčným Scenárom 1 (-15,67 kg CO_{2e}/m²). Hoci sa tento viazaný uhlík uvoľňuje vo fáze konca životnosti budovy (C1-C4), kedy Scenár 2 vykazuje emisie 60,60 kg CO_{2e}/m² oproti Scenáru 1 (33,48 kg CO_{2e}/m²), celková bilancia životného cyklu hovorí jasne v prospech ekologického riešenia. V konečnom zúčtovaní vrátane započítania recyklačného kreditu v module D totiž Scenár 2 prináša čistú úsporu vyše 59 kg CO_{2e}/m² oproti Scenáru 1. Prírodné materiály navyše znižujú potenciál acidifikácie pôdy a vôd (AP) vo výrobnnej fáze z pôvodných 1,856 mol H⁺ eq./m² na 1,76 mol H⁺ eq./m² a spotreba primárnych fosílnych zdrojov (ADP-FF) vo výrobnnej fáze klesla z hodnoty 6290,32 MJ/m² na 6100 MJ/m², čo potvrdzuje úspešné nahradenie ropných produktov. Smerovanie k princípom cirkulárnej ekonomiky „Cradle-to-Cradle“ potvrdzujú prínosy mimo hraníc systému v module D, kde Scenár 2 generuje environmentálny kredit až -568, kg CO_{2e}/m², čo prekonáva materiály Scenára 1 o viac než 10%. Najväčší rozdiel nastáva pri ochrane vodných zdrojov (WU), kde modul D v Scenári 2 dosahuje environmentálny benefit -13 800 m³/m² oproti iba -548,33 m³/m² v Scenári 1, čo dokumentuje minimálnu reziduálnu záťaž biologicky rozložiteľných látok v prírode. Ekonomické hodnotenie nákladov životného cyklu (LCC) v zmysle noriem ISO 15686-5 a EN 16627 prináša do analýzy kľúčový argument finančnej udržateľnosti oboch dekarbonizačných prístupov. Zachovanie pôvodného stavu budovy bez stavebného zásahu predstavuje z dlhodobého hľadiska neefektívne ekonomické zaťaženie samosprávy s hodnotou konštrukčnej fázy na úrovni 1 217 541 € viazanou na zanedbaný a neoptimalizovaný fond. Realizácia hĺbkovej obnovy v konvenčnom Scenári 1 vyžaduje najnižšie vstupné stavebné náklady (moduly A0-A5) na úrovni 1 093 523 €. Inovatívny Scenár 2 si kvôli vyššie obstarávacej cene udržateľných materiálov žiada počiatočnú investíciu vo výške 1 141 129 €, čo znamená približne 4,3% nárast počiatočných výdavkov oproti prvému scenáru. Finančná

opodstatnenosť a jednoznačná ekonomická návratnosť Scenára 2 sa však prejavuje priamo vo fáze užívania budovy, konkrétne v nákladoch na periodickú obnovu, výmeny a opravy komponentov v moduloch B4-B5. V tejto kategórii vykazuje Scenár 2 najnižšie náklady vo výške iba 296 705,50 €, kým konvenčný Scenár 1 zaťažuje rozpočet sumou až 441 360,57 € a pôvodná údržba by si vyžiadala 325 114 m³/m². Scenár 2 tak počas 50 rokov prevádzky školy prináša čistú úsporu na údržbe a obnove vo výške 144 655,07 €. Tento rozdiel dokazuje, že hoci sú prírodné stavebné izolácie investične náročnejšie, vykazujú vyššiu životnosť, materiálovú stabilitu a eliminujú potrebu častých cyklických výmen. Fáza konca životnosti (moduly C1-C4) už rozpočty ovplyvňuje minimálne, pričom Scenár 2 si vyžaduje 78 337,73 € a Scenár 1 celkovo 75 069,61 €, kde mierne zvýšenie opäť priamo súvisí so špecifickým procesom selektívnej likvidácie, demontáže a triedenia použitých bio-materiálov.

5.2.7 Diskusia

Mnohé európske štúdie zamerané na analýzu životného cyklu (LCA) školských budov poukazujú na to, že pri prechode na ultranízkoenergetický štandard (A0) začínajú zabudované emisie materiálov dominovať nad prevádzkovými. Napríklad rozsiahly výskum udržateľnosti verejných budov v strednej Európe ukázal, že pri konvenčnom zateplení (syntetické materiály na báze ropy) môžu emisie z výrobného fázy (A1-A3) predstavovať až 40% až 50% celkovej uhlíkovej stopy budovy v 50-ročnom cykle. Tento trend presne kopíruje aj Scenár 1, kde výroba konvenčných materiálov vygenerovala až 786,29 kg CO_{2e}/m². Naopak, integrácia bio-materiálov vykazuje v medzinárodnom kontexte konzistentné úspory. Štúdie posudzujúce stavebné izolácie na báze drevovlákn, konope či slamy potvrdzujú fenomén tzv. negatívnych počiatočných emisií vďaka biogénemu viazaniu uhlíka (GWP-biogénny). Výskumy realizované na škandinávskych a rakúskych verejných objektoch deklarujú, že prírodné materiály dokážu eliminovať počiatočnú uhlíkovú stopu konštrukcií o 5% až 12% oproti minerálnej vlny či polystyrénu. Nami nameraná úspora 6,8% vo výrobnom fáze Scenára 2 a 3,2-násobne vyšší objem viazaného biogénneho uhlíka tak korešponduje s týmito progresívnymi európskymi zisteniami. Z hľadiska cirkulárnej ekonomiky a systémovej hranice „Cradle-to-Cradle“ je kľúčovým bodom diskusie Modul D. Viacerí autori zaoberajúci sa dekarbonizáciou stavebníctva zdôrazňujú, že materiály na báze biomasy majú po skončení životnosti budovy obrovský energetický a recyklačný potenciál. Kým konvenčné izolácie po demolácii často končia ako environmentálna záťaž na skládkach (čo zvyšuje náklady aj emisie vo fázach C3-C4), bio-materiály vracajú do systému vysoký ekologický kredit. To sa potvrdilo aj v predkladanej štúdii, kde Scenár 2 dosiahol v module D o 10% vyšší dekarbonizačný kredit (-568 kg CO_{2e}/m²) než Scenár 1. V rovine nákladov životného cyklu (LCC) sa štúdia rozchádza s častým, no povrchným názorom, že ekologická výstavba je pre verejný sektor dlhodobo neúnosne drahá. Výskumy zaoberajúce sa metodikou LCC pri renováciách škôl potvrdzujú, že hoci pokročilé prírodné materiály zvyšujú počiatočné investičné výdavky (v tejto štúdii o 4,3%), ich aplikácia zásadne predlžuje životnosť konštrukčných detailov a znižuje frekvenciu opráv. Obdobné LCC analýzy zo západnej Európy poukazujú na to, že eliminácia tepelných mostov a prirodzená regulácia vlhkosti bio-materiálmi znižujú náklady na údržbu a obnovu (B4-B5) v rozsahu 15% až 35%.

6 Rekonštrukcia kultúrneho domu - analýza dekarbonizačného potenciálu a ekonomických aspektov

Hlavným cieľom tejto kapitoly je komplexná environmentálna a ekonomická analýza hĺbkovej rekonštrukcie konkrétneho objektu – budovy multifunkčného kultúrneho domu. Prostredníctvom tejto prípadovej štúdie kvantifikujeme nielen potenciál úspor primárnej energie a zníženia emisií skleníkových plynov (v prevádzkovej aj viazanej fáze), ale zároveň posudzujeme aj ekonomickú efektívnosť a návratnosť investovaných prostriedkov.

Zameranie na budovu kultúrnej a spoločenskej infraštruktúry má okrem technicko-ekonomického rozmeru aj silný spoločenský aspekt. Modernizácia kultúrnych domov totiž priamo prispieva k skvalitneniu vnútorného prostredia pre návštevníkov, zamestnancov a účinkujúcich, pričom zároveň slúži ako príklad dobrej praxe pre samosprávy, ktoré nesú hlavnú zodpovednosť za obnovu a udržateľnosť lokálneho kultúrneho dedičstva a občianskej vybavenosti na Slovensku.

6.1 Inventarizačná analýza

Analýza inventarizácie životného cyklu (LCI) bola použitá na výpočet uhlíkovej stopy a ďalších environmentálnych indikátorov počas celého životného cyklu navrhovaných scenárov rekonštrukcie kultúrneho domu. Skladby stavebných konštrukcií (obvodového plášťa, strechy, stropov a otvorových konštrukcií) boli v modeloch navrhnuté a optimalizované tak, aby po rekonštrukcii bezpečne spĺňali prísne tepelno-technické požiadavky na súčiniteľ prechodu tepla (U) a tepelný odpor (R) v zmysle normy STN 73 0540-2+Z1+Z2 pre obnovu budov. Okrem stavebnej časti inventarizácia zohľadňuje aj modernizáciu technologických systémov budovy, najmä inštaláciu núteného vetrania s rekuperáciou tepla a integráciu efektívneho zdroja tepla v podobe tepelných čerpadiel, ktoré zásadným spôsobom ovplyvňujú materiálové toky a energetickú bilanciu v prevádzkovej fáze objektu.

Architektonicko-konštrukčná a materiálová charakteristika pôvodného stavu objektu

Podrobná analýza navrhovaného stavebno-technického stavu budovy multifunkčného kultúrneho domu vychádza z predloženej projektovej dokumentácie nového stavu. Z hľadiska materiálového zloženia a typológie konštrukcií ide o murovaný objekt (1. PP - 3. NP), pri ktorom sa v rámci obnovy systematicky odstraňujú tepelné mosty a zvyšuje sa tepelno-technická ochrana obalu budovy.

Vertikálne nosné a výplňové konštrukcie

Nosný systém objektu pozostáva z pôvodných konštrukcií, ktoré sú v rámci rekonštrukcie komplexne zateplené exteriérovým zatepľovacím systémom.

- Obvodový plášť: Primárnu obalovú konštrukciu tvorí pôvodné tehlové murivo v hrúbkach 300 mm, 450 mm a 500 mm. V zmysle energetického auditu je navrhnuté komplexné zateplenie obvodových stien zatepľovacím systémom s použitím minerálnych izolačných dosiek s hrúbkou 140 mm. Ostenia okenných a dverných otvorov sú izolované minerálnou vlnou hrúbky 40 mm. Finálnu povrchovú úpravu tvorí silikónová omietka.

- Vnútorne nosné steny a priečky: Vnútorne deliace a nosné konštrukcie nadväzujú na pôvodný konštrukčný systém. V priestoroch únikových ciest a predelov požiarnych úsekov sú navrhnuté nové konštrukcie a požiarné dvere s požiarnou odolnosťou.

Horizontálne konštrukcie a stropné systémy

Typológia podláh a stropov zdôrazňuje prevádzkovú náročnosť jednotlivých zón kultúrneho domu, od hlavnej sály až po administratívno-technické zázemie.

- Stropná konštrukcia a podlahy nad 1. NP (2. NP): Na druhom nadzemnom podlaží sa nachádza rôzna škála podlahových vrstiev podľa účelu miestností. V priestoroch malej sály, chodieb a schodísk je realizovaná betónová, resp. keramická dlažba. V priestoroch administratívy a zasadacích miestností sú navrhnuté drevené parkety, ktoré prispievajú k vnútornej pohode. Technické priestory a sklady využívajú hygienicky umývateľnú podlahovú krytinu na báze PVC.
- Podlahové vrstvy 1. NP: Prízemie kombinuje reprezentatívnu betónovú dlažbu a keramickú dlažbu v komunikačných uzloch, zádverí, bufete, kuchyni a sociálnych zariadeniach. Priestor hlavného hľadiska, javiska, šatní pre účinkujúcich a klubovní je opatrený drevenými parketami navrhnutými pre akustické a mechanické zaťaženie.

Strešný plášť a konštrukcia podkrovia

Z hľadiska tepelných strát cez horizontálne konštrukcie prechádza objekt zásadnou modernizáciou, predovšetkým v oblasti zateplenia podkrovia a stropu povalového priestoru.

- Zateplenie stropu a povaly: Nad vykurovanými priestormi 3. NP (kde sa nachádzajú priestory knižnice a skladov) je navrhnutá horizontálna izolácia povalového priestoru. Skladba zateplenia podkrovia zahŕňa odstránenie pôvodného násypu a realizáciu nového izolačného systému.
- Materiálové riešenie izolácie strechy: Konštrukcia obsahuje parozábranu, minerálnu tepelnú izoláciu vkladajú medzi drevené hranolčeky, paropriepustnú kontaktnú fóliu a záklop z dosiek OSB. Šikmé steny podkrovia sú zateplené minerálnou vlnou hrúbky 140 mm v kombinácii so zateplovacím systémom obvodového plášťa, čím sa eliminuje únik tepla cez strešnú rovinu.

Výplne otvorov

Všetky novo navrhované exteriérové výplne otvorov (okná, vstupné dvere, zasklené steny zádverí) sú navrhnuté tak, aby spĺňali sprísnené kritériá pre verejné budovy. V interiéri sú podľa požiarnej správy osadené dverné konštrukcie so špecifickou požiarnou odolnosťou, ktoré okrem energetickej funkcie zaisťujú aj požiarne bezpečnosť objektu.

Architektonicko-konštrukčná a materiálová charakteristika nového stavu objektu

Podrobná analýza navrhovaného stavebno-technického stavu budovy kultúrneho domu vychádza z predloženej projektovej dokumentácie nového stavu. V rámci hĺbkovej obnovy bol z hľadiska systematickej dekarbonizácie, minimalizácie viazaných emisií skleníkových plynov a znižovania prevádzkovej uhlíkovej stopy navrhnutý Scenár 1. Tento scenár transformuje pôvodný murovaný objekt prostredníctvom cieľenej integrácie prírodných, uhlíkovo neutrálnych materiálov a moderných environmentálnych technológií. V celom koncepte Scenáru 1 sa systematicky odstraňujú kritické tepelné mosty, zvyšuje sa tepelno-technická

ochrana obalu budovy a optimalizujú sa materiálové toky s cieľom dosiahnuť prísne kritériá pre moderné dekarbonizované stavby.

Zateplenie obvodového plášťa a základov (Systém ETICS a fúkaná izolácia)

Všetky nové zatepľovacie vrstvy sú navrhnuté s cieľom viditeľne zlepšiť tepelno-technické vlastnosti budovy multifunkčného kultúrneho domu pri ekologickejšom prístupe k stavebným materiálom.

- Zateplenie obvodovej steny: V novom návrhu sa namiesto tradičných silikátových izolácií uplatňuje ekologická tepelná izolácia na báze celulózy (v hrúbke 160 mm), aplikovaná v kombinácii s predpripraveným roštovým systémom, difúznou fóliou a finálnym kontaktným zatepľovacím systémom (ETICS), resp. fasádny obkladom. Okolo všetkých otvorových konštrukcií sa vytvoria ostenia z izolačných dosiek v hrúbke 30 mm na účinnú elimináciu tepelných mostov.
- Zateplenie základov a sokla: Z dôvodu priameho kontaktu s vlhkosťou sa v spodnej stavbe použije nová tepelná izolácia z XPS (extrudovaný polystyrén) v hrúbke 100 mm, lepená systémom ETICS a zapustená až 500 mm pod úroveň terénu. S tým súvisia aj nové výkopy pre odkopanie a zateplenie základov s hĺbkou 500 mm pozdĺž zasiahnutých častí objektu.

Výplne otvorov (Nové okná a dvere)

V rámci plánovanej obnovy budovy kultúrneho domu dochádza k výmene a osadeniu nových okenných a dverných konštrukcií, ktoré projekt presne špecifikuje podľa rozmerov a umiestnenia na jednotlivých podlažiach. Nové dverné konštrukcie na 1.NP a 2.NP zabezpečia modernizáciu vstupných uzlov, akustickú pohodu a požiaru bezpečnosť chránených únikových ciest.

Nová strešná konštrukcia a zateplenie stropov

V novom návrhu sa počíta s odstránením degradovaných strešných vrstiev a krytiny až po pôvodný nosný železobetónový stropný panel povaly.

- Zateplenie stropov a podkrovia celulózou: Horizontálne konštrukcie stropu pod povalou a šikmé steny podkrovia sú tepelne izolované fúkanou celulózovou izoláciou v celkovej projektovanej hrúbke 340 mm vkladanou medzi pomocné drevené hranolčeky. Skladba je doplnená o vysoko účinnú parozábranu zo spodnej strany a paropriepustnú fóliu z vrchnej strany s finálnym pochôdnym záklopom z OSB dosiek v povalovom priestore.
- Nosná konštrukcia a strešný plášť: Na úrovni podkrovia sa realizuje nový obvodový ŽB veniec s integrovanými pomúrniciami. Nosná konštrukcia strechy je tvorená novým krovom (drevenými prvkami/väzníkmi), na ktorých je zhotovené plné debnenie z dosiek hrúbky 25 mm.
- Krytina a doplnky: Ako finálna vrstva je navrhnutá nová strešná krytina z falcovaného plechu s hrúbkou 0,5 mm položená na poistnej hydroizolácii so štruktúrovanou rohožou. Súčasťou sú nové klampiarske prvky (žľaby, zvody, oplechovania) a vyvedenie/predĺženie všetkých vetracích potrubí vzduchotechniky (VZT) nad novú úroveň strešnej roviny.

Nové technické a technologické miestnosti (Zázemie pre OZE)

V rámci rekonštrukcie a dispozičných úprav vzniká moderné technické zázemie pre obnoviteľné zdroje energie (OZE) a vzduchotechniku, ktoré zabezpečujú dramatické zníženie prevádzkových nákladov (LCC):

- Technologické zázemie v interiéri: Projekt uvažuje s využitím priestorov pre technické zabezpečenie budovy. Ide predovšetkým o priestor kotolne (v podzemnom podlaží/1. PP), kde sa nachádzajú vnútorné jednotky a akumulčné zásobníky pre vykurovací systém. Na vyšších podlažiach sú situované technické miestnosti a sklady pre pridružené technológie a rozvody núteného vetrania s rekuperáciou tepla.
- Exteriérové zázemie (Tepelné čerpadlá): V exteriéri objektu (v nadväznosti na kotelňu) sú vybudované nové ŽB základové pásy a pätky pre osadenie vonkajších jednotiek plynových tepelných čerpadiel. Tieto základy sú vyhotovené minimálne 250 mm nad úrovňou upraveného terénu, čím sú chránené pred klimatickými vplyvmi a snehom, a sú osadené na tlmičoch vibrácií pre zamedzenie šírenia hluku do konštrukcie kultúrneho domu.

Tab. 6.1 Výmena materiálov oproti pôvodnému modelu

Model obvodovej steny	Skladba vrstiev (zvnútra von)	R [m ² ·K/W]	U [W/m ² ·K]
Pôvodná skladba	Vápenná omietka (15) + Tehla (450) + Minerálna vlna (140) + Vápenno-cementová omietka	4,25	0,22
Model 1: Celulózová izolácia	Vápenno cementová omietka (20) + Tehla (450) + Celulózová izolácia (240) + Silikátová omietka	6,95	0,14
Model stropu	ŽB stropná doska + Minerálna vlna + Keramická dlažba/ Parkety/ PVC podlaha		
Model strechy	Skladba vrstiev (z interiéru von)	R [m ² ·K/W]	U [W/m ² ·K]
Pôvodný Projekt	SDK (12,5) + Parozábrana + Minerálna vlna (300) + Poistná fólia + 2x Asfaltový pás	6,35	0,15
Model 1: Celulózová izolácia	SDK (12,5) + Parozábrana + Fúkaná celulóza (280) + Poistná fólia + 2x Asfaltový pás	7,36	0,15
Model stropu	ŽB stropná doska + Celulózová izolácia + Keramická dlažba/ Parkety/ PVC podlaha		

6.2. Analýza vplyvov na životné prostredie

V rámci fázy hodnotenia vplyvov na životné prostredie (LCIA) boli vyhodnotené všetky inventarizačné dáta zhromaždené pre dva navrhované modely komplexnej obnovy budovy základnej školy. Zvolený prístup LCA posudzoval viaceré kategórie environmentálnych vplyvov v prísnom súlade s európskou normou EN 15804+A2. Prehľad hodnotených kategórií vplyvov je uvedený v tabuľke 6.2. Tieto kategórie boli na účely podrobnejšej interpretácie rozdelené na globálne, regionálne a lokálne.

Tab. 6.2 Parametre popisujúce základné vplyvy na životné prostredie

Kategória vplyvu	Skratka	Jednotka
Potenciál globálneho otepľovania – celkový	GWP-celkový	kg CO _{2e}
Potenciál globálneho otepľovania – fosílny	GWP-fosílny	kg CO _{2e}
Potenciál globálneho otepľovania – biogénny	GWP-biogénny	kg CO _{2e} bio
Potenciál globálneho otepľovania – využitie krajiny a zmena využitia krajiny	GWP-LULUC	kg CO _{2e}
Potenciál úbytku stratosférickej ozónovej vrstvy	ODP	kg CFC 11 e
Potenciál acidifikácie (okysľovania) pôdy a vody	AP	mol H ⁺ e.
Potenciál eutrofizácie pre sladkovodné prostredie	EP-AF	kg P e
Potenciál eutrofizácie pre morské prostredie	EP-AM	kg N e
Potenciál terestrickej (suchozemskej) eutrofizácie	EP-T	mol N e
Potenciál tvorby troposférického ozónu	POCP	kg NMVOC e
Potenciál úbytku abiotických surovín pre nefosílnu zdroj	ADP-E	kg Sb e
Potenciál úbytku abiotických surovín pre fosílnu zdroj	ADP-FF	MJ
Potenciál nedostatku vody	WD	m ³

6.2.1 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov LCA (Pôvodný stav)

Kvantitatívna analýza životného cyklu (LCA) odhaľuje distribúciu environmentálnej záťaže v jednotlivých fázach. Hodnotenú sú primárne kategórie vplyvu: GWP-celkový, GWP-fosílny, GWP-biogénny a GWP-LULUC.

Táto kapitola sa zaoberá vyhodnotením environmentálnych vplyvov pôvodného stavebno-technického stavu kultúrneho domu prostredníctvom metodiky LCA. Výsledky sú vyjadrené v kategóriách potenciálu globálneho otepľovania (GWP) v ekvivalentoch CO₂ a sú rozčlenené podľa jednotlivých modulov životného cyklu budovy v súlade s normou EN 15978.

Celkový potenciál globálneho otepľovania (GWP-celkový) pôvodného stavu objektu predstavuje hodnotu 4 873,32 kg CO_{2e}/m². Z hľadiska materiálového zloženia a energetických tokov je táto stopa takmer výhradne tvorená fosílnou zložkou (GWP-fosílny = 4 875,97 kg CO_{2e}/m²). Vplyv biogénneho uhlíka, teda uhlíka viazaného v prírodných materiáloch na báze dreva, je s hodnotou -4,63 kg CO_{2e}/m² zanedbateľný, čo potvrdzuje, že ide o silikátovú stavbu (betón, tehla, kovy) s minimálnym zastúpením obnoviteľných materiálov. Podiel kategórie GWP-LULUC je s hodnotou 1,99 kg CO_{2e}/m² pre celkové hodnotenie zanedbateľný. Podrobné

výsledky jednotlivých kategórií a fáz GWP pre pôvodný stav objektu sú uvedené v tabuľke 6.3 a obrázku 6.1.

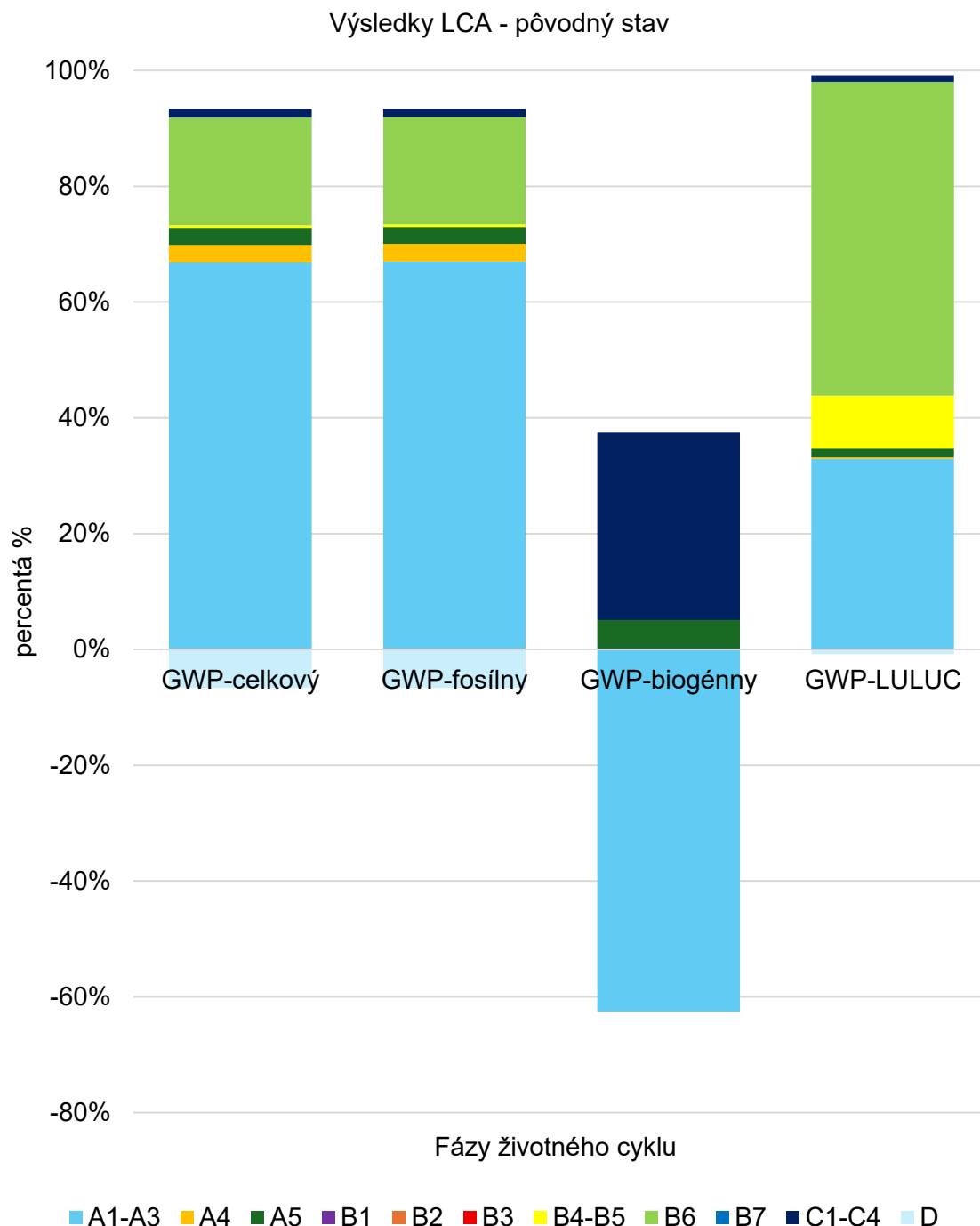
Tabuľka 6.3 Výsledky LCA hodnotených fáz životného cyklu pre kultúrny dom kg CO_{2e}/m²

Ukazovatele	A1-A3	A4	A5	B1-B3	B4-B5	B6	B7	C1-C4	D	Celkovo
GWP-celkový	3489,1	158,14	152,52	0	22,06	972,51	1,59	77,43	-345,8	4873,3
GWP-fosílny	3499,9	158,13	151,55	0	21,87	971,42	1,59	71,42	-345,7	4875,9
GWP-biogénny	-11,55	0	0,94	0	0	0	0	5,97	0	-4,63
GWP-LULUC	0,658	0,0049	0,030	0	0,183	1,084	0,0002	0,023	-0,016	1,98

Fáza výroby, zahŕňajúca ťažbu surovín, dopravu do závodu a samotnú výrobu stavebných materiálov (moduly A1–A3), predstavuje s hodnotou 3 489,1 kg CO_{2e}/m² druhý najvýznamnejší príspevok k celkovému GWP. Táto hodnota reprezentuje tzv. zabudovaný uhlík pôvodných nosných a obalových konštrukcií.

Z pohľadu dekarbonizačných stratégií je táto hodnota kľúčovým argumentom v prospech rekonštrukcie namiesto demolácie. Keďže tieto emisie už boli do atmosféry uvoľnené, zachovaním maximálneho možného množstva pôvodných konštrukcií (napr. skeletu, základov a nosných stien) sa predíde nutnosti vygenerovať nový zabudovaný uhlík spojený s výrobou nových stavebných materiálov pre novostavbu.

Emisie spojené s dopravou materiálov na stavenisko (modul A4) a samotnou realizáciou stavby vrátane procesov na stavenisku a odpadového hospodárstva počas výstavby (modul A5) dosahujú hodnoty 158,14 kg CO_{2e}/m² (A4), resp. 152,52 kg CO_{2e}/m² (A5). V kontexte celého životného cyklu budovy predstavujú tieto moduly relatívne nízku záťaž, čo zodpovedá štandardným priebehom LCA analýz budov, kde fázy dopravy a mechanizácie na stavenisku tvoria iba minoritný podiel uhlíkovej stopy.



Obr. 6.2 Výsledky LCA pre ukazovatele životného cyklu

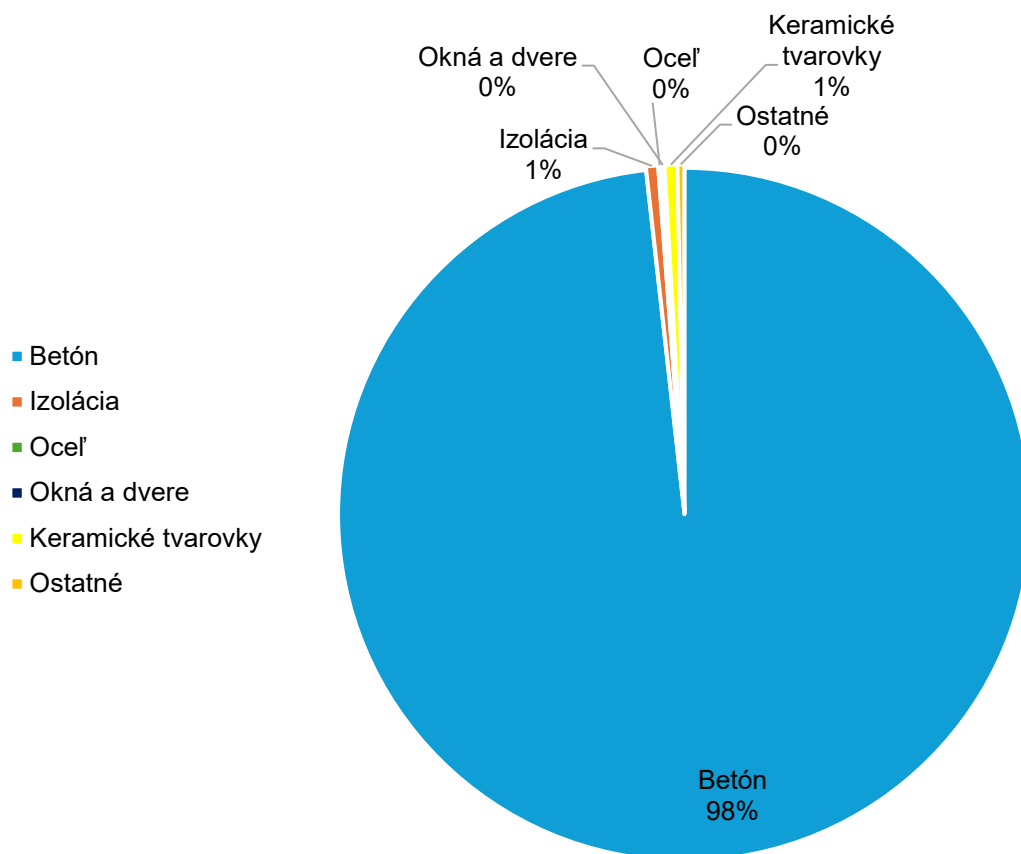
Fáza užívania budovy vykazuje nerovnomerné rozdelenie emisií. Modul obnovy a výmeny prvkov s kratšou životnosťou (B4–B5) dosahuje len minimálnu úroveň 22,06 kg CO_{2e}/m². Taktiež prevádzková spotreba vody (B7) má s hodnotou 1,59 kg CO_{2e}/m² zanedbateľný environmentálny vplyv. Absolútne kritickým bodom celého životného cyklu je však modul B6 – prevádzková energia, ktorý dosahuje hodnotu 972,51 kg CO_{2e}/m². Táto vysoká hodnota reflektuje nízku energetickú efektívnosť pôvodného stavu kultúrneho domu, typickú pre staršie objekty s nedostatočnými tepelnoizolačnými vlastnosťami obalových konštrukcií a zastaranou technologickou infraštruktúrou (napr. neefektívne zdroje tepla na fosílna palivá). Práve modul B6 predstavuje primárny cieľ pre dekarbonizačné opatrenia, kde aplikáciou zateplenia,

výmenou výplní otvorov a integráciou obnoviteľných zdrojov energie (OZE) možno dosiahnuť najvýraznejší pokles emisií CO₂. Fáza demolácie a konca životnosti budovy (moduly C1–C4), zahŕňajúca demoláciu, odvoz sutiny a jej finálne uloženie či spracovanie, generuje emisie na úrovni 77,43 kg CO_{2e}/m². Tento príspevok je minoritný. Zásadným ukazovateľom je však modul D, ktorý vykazuje zápornú hodnotu -345,80 kg CO_{2e}/m². V metodike LCA záporná hodnota v module D predstavuje čistý environmentálny benefit a kredity priradené budove za materiály, ktoré je možné po ukončení životnosti recyklovať alebo energeticky zhodnotiť (napr. recyklácia stavebnej ocele, opätovné využitie betónového recyklátu). Tento potenciál znižuje celkový dopad objektu na životné prostredie, keďže nahrádza potrebu ťažby a výroby primárnych surovín v budúcich projektoch.

V rámci fázy A1–A3 boli podrobne vyhodnotené jednotlivé stavebné materiály, konštrukčné prvky a technológie budovy. Analýza zabudovaného uhlíka odhaľuje, ktoré materiálové skupiny najviac zaťažujú životné prostredie a kde sa nachádza najväčší potenciál pre úspory pri návrhu dekarbonizácie.

Najväčším zdrojom zabudovaného uhlíka v celom objekte sú betónové zmesi. Výrazným prvkom je betón triedy C25/30 (využívajúci čistý portlandský cement CEM I), ktorý produkuje vysoké emisie na úrovni približne 6,94x10E6 kg CO_{2e} (GWP-celkový). Ďalšie položky betónu triedy C30/37 prispievajú hodnotami 44 100 kg CO_{2e}. Významnú stopu zanechávajú aj podlahové vrstvy, kde cementové potery dosahujú hodnotu 19 700 kg CO_{2e} a rýchloschnúce potery prispievajú 3 490 kg CO_{2e}. Tento veľký podiel betónu potvrdzuje, že zachovanie existujúcich betónových konštrukcií (základy, skelet, stropy) je základným pilierom dekarbonizácie tohto objektu. Druhú významnú skupinu tvoria materiály pre zvislé konštrukcie. Keramické tvárnice určené pre obvodové a vnútorné murivo vykazujú vysokú uhlíkovú stopu. Konkrétne položky dosahujú hodnoty 10 200 kg CO_{2e} a 4 260 kg CO_{2e}. Ďalšia položka zahŕňajúca tehly pre priečky pridáva ďalších 1 580 kg CO_{2e}. Tieto keramické materiály zároveň vykazujú výrazne záporné hodnoty v kategórii biogénneho uhlíka, čo indikuje špecifické modelovanie viazaného uhlíka pri ich výpalu alebo balení v databáze LCA, avšak ich celkový fosílny dopad zostáva vysoký. K týmto konštrukciám sa viaže aj vápennocementová omietka s príspevkom 9 820 kg CO_{2e}.

V pôvodnom stave objektu sa nachádza viacero typov izolačných materiálov, ktorých zabudovaný uhlík nie je zanedbateľný. Dosky z kamennej minerálnej vlny na zateplenie stien a strechy dosahujú hodnoty v rozmedzí od 1 020 do 7 880 kg CO_{2e} v závislosti od hrúbky a objemovej hmotnosti. Tepelná izolácia z extrudovaného polystyrénu (XPS) prispievajú hodnotou 3 230 kg CO_{2e}. Asfaltové hydroizolačné pásy pre strechy a spodnú stavbu majú stabilný príspevok okolo 533 kg CO_{2e} na jednu položku. Pri rekonštrukcii bude dôležité nahradiť tieto pôvodné materiály pri ich výmene ekologickejšími alternatívami s nižším fosílnym GWP. Konštrukčná oceľ a výstuž tvoria dôležitú zložku zabudovaného uhlíka. Výstuž s 97 % podielom recyklovaného obsahu produkuje emisie vo výške 3 980 kg CO_{2e}. Použitie recyklovanej ocele výrazne znižuje emisie oproti prvovýrobe. Výplne otvorov, ako sú hliníkové dvere (738 kg CO_{2e}) a okná s plastovými profilmi a hliníkovým krytím s trojitým zasklením (7 900 kg CO_{2e}), predstavujú kvôli náročnej výrobe taktiež významné položky.



Obr. 6.3 Analýza materiálov s najväčším environmentálnym vplyvom v percentách

6.2.2 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Scenár 1)

Scenár 1 dosahuje celkovú bilanciu potenciálu globálneho otepľovania (GWP-celkový) na úrovni 2 412,43 kg CO_{2e} (po započítaní benefitov v module D). Pri podrobnejšom pohľade na zloženie emisií je zrejmé, že environmentálnu záťaž poháňa takmer výlučne fosílna zložka, kde GWP-fosílny dosahuje vo fázach A až C hodnotu 2 411,35 kg CO_{2e}. Vplyv biogénneho uhlíka (viazaného v materiáloch na báze biomasy) vo fáze výroby vykazuje zápornú hodnotu -4,30 kg CO_{2e}, čo indikuje mierne zastúpenie ekologických materiálov a drevených prvkov. Ukazovateľ GWP-LULUC, spojený s využívaním pôdy, je s výslednou hodnotou 1,66 kg CO_{2e} pre celkovú bilanciu tohto scenára nepodstatný. Podrobné výsledky jednotlivých kategórií a fáz GWP pre scenár 1 objektu kultúrneho domu sú uvedené v tabuľke 6.4 a obrázku 6.4.

Tab. 6.4 Výsledky LCA hodnotených fáz životného cyklu pre kultúrny dom kg CO_{2e}/m²

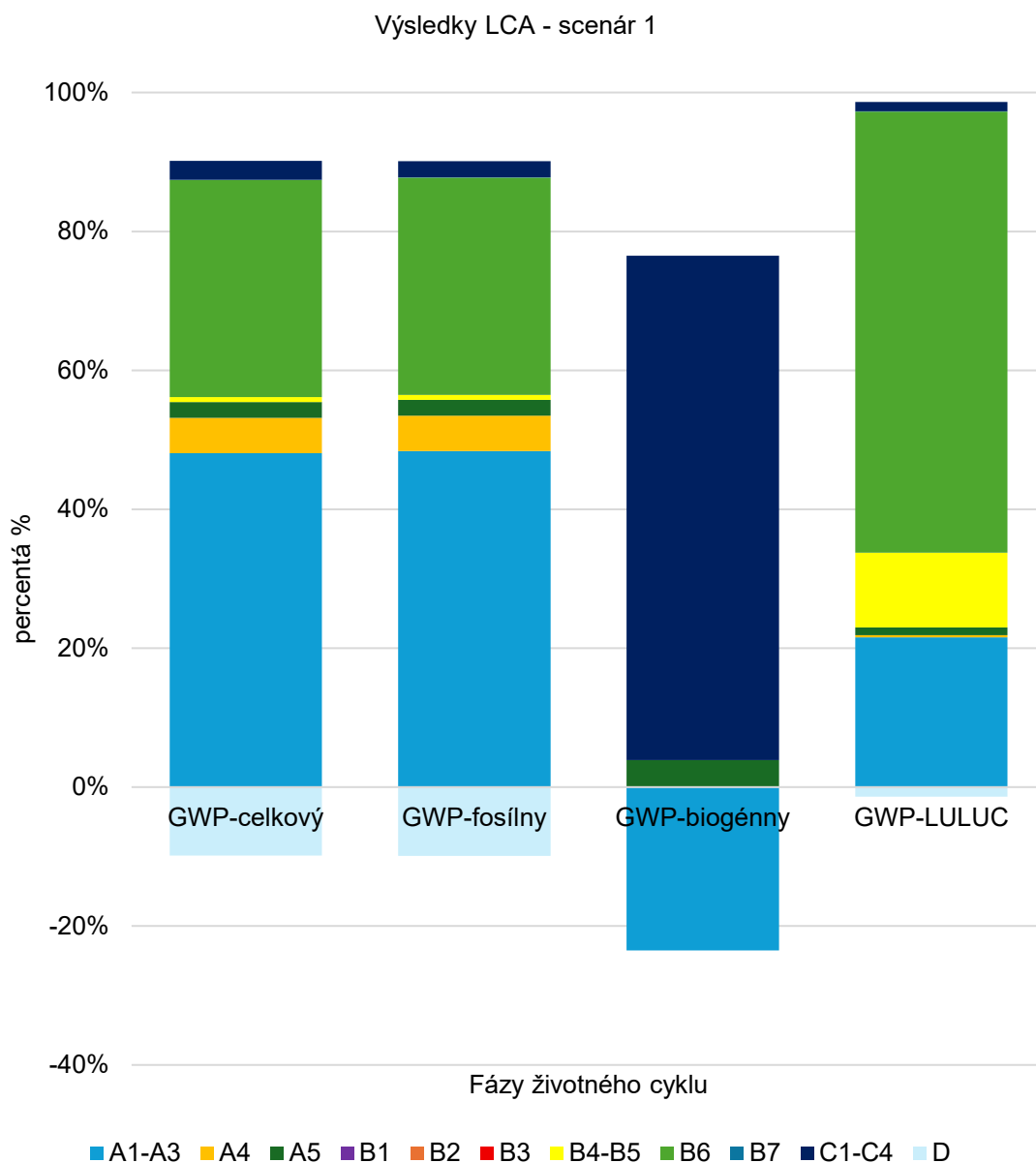
Ukazovatele	A1-A3	A4	A5	B1-B3	B4-B5	B6	B7	C1-C4	D	Celkovo
GWP-celkový	1497.42	158.16	71.9	0	22.06	972.51	1.59	84.70	-307.08	2808.36
GWP-fosílny	1501.36	158.16	71.17	0	21.88	971.43	1.59	71.39	-307.06	2796.98
GWP-biogénny	-4.29	0	0.712	0	0	0	0	13.28	0	9.70
GWP-LULUC	0.368	0.0049	0.019	0	0.183	1.084	0.0002	0.023	-0.023	1.68

Najvýznamnejší environmentálny zásah v Scenári 1 nastal vo výrobnej fáze A1-A3, kde hodnota GWP-celkový dosahuje 1 497,43 kg CO_{2e}/m². Táto fáza tvorí najväčší podiel emisií na strane materiálového cyklu (predstavuje zabudovaný uhlík). Dosiahnutá úroveň indikuje, že v konštrukčnom riešení sa uvažovalo s vysokou mierou zachovania pôvodných nosných prvkov (vďaka čomu sa do modelu nepremietla emisia z novej prvovýroby), a pôvodné materiály boli pri úpravách nahradené alternatívami s nižšou uhlíkovou intenzitou. Modul A4 produkuje 158,17 kg CO_{2e}/m², odzrkadľuje emisie z prepravy materiálov a potvrdzuje bežný logistický profil stavby. Hodnota 71,90 kg CO_{2e}/m² v module A5 poukazuje na nízku tvorbu stavebného odpadu priamo na stavenisku a na aplikáciu technologických postupov, ktoré minimalizujú spotrebu energie a mechanizácie počas montážnych prác.

Moduly B1-B3 vykazujú minimálnu záťaž. Moduly a procesy výmeny prvkov (B4-B5) dosahujú len 22,06 kg CO_{2e}/m². Hodnota modulu B6 972,51 kg CO_{2e}/m² je dominantnou zložkou fázy užívania. Budova si z hľadiska spotreby energií zachováva pôvodný charakter, čo znamená, že tento scenár bol striktnie orientovaný na materiálovú a konštrukčnú optimalizáciu (fázy A), zatiaľ čo energetická dekarbonizácia zostáva otvorená pre ďalšie modelovanie.

Modul B7 dosahuje zanedbateľnú hodnotu 1,59 kg CO_{2e}/m². Fáza dekonštrukcie a konca životného cyklu (C1-C4) prispieva k uhlíkovej stope hodnotou 84,71 kg CO_{2e}. V tejto fáze je zaujímavý nárast biogénneho uhlíka na 13,29 kg CO_{2e bio}/m² čo znamená, že použité biogénne materiály pri svojej likvidácii (napr. spaľovaním alebo skládkovaním) uvoľňujú predtým viazaný CO₂. Modul D dosahuje zápornú hodnotu -307,08 kg CO_{2e}/m². Tento výsledok predstavuje výrazný environmentálny benefit za recyklovateľnosť navrhnutých materiálov. Dokazuje, že konštrukčné prvky použité v Scenári 1 sú po skončení životnosti budovy ľahko separovateľné a schopné nahradiť primárne suroviny v ďalšom produkčnom cykle.

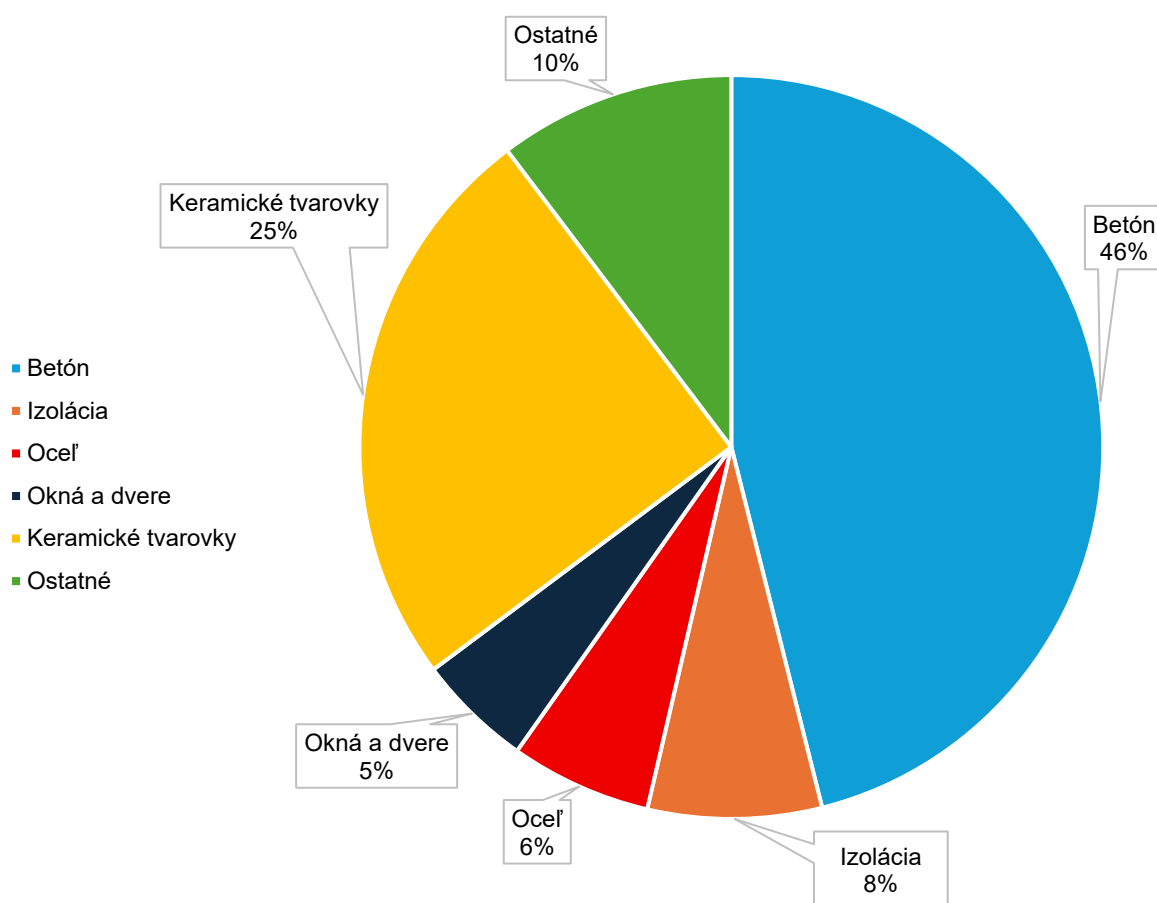
V rámci fázy A1–A3 boli podrobne vyhodnotené jednotlivé stavebné materiály, konštrukčné prvky a technológie budovy. Analýza zabudovaného uhlíka odhaľuje, ktoré materiálové skupiny najviac zaťažujú životné prostredie a kde sa nachádza najväčší potenciál pre úspory pri návrhu dekarbonizácie.



Obr. 6.4 Výsledky LCA pre ukazovatele životného cyklu

Z hľadiska objemu zabudovaných emisií tvoria najvýznamnejšiu zložku Scenára 1 betónové zmesi a podlahové vrstvy. Hlavným konštrukčným prvkom je transportný betón triedy C25/30, ktorý využíva vysokopecný cement CEM III/B a generuje fosílnu emisiu na úrovni $2,89 \times 10^6$ kg CO_{2e}. Ďalšie nosné časti sú realizované z betónu triedy C30/37 s cementom CEM IV/B-V, pričom tieto položky vykazujú príspevky vo výške 29 900 kg CO_{2e} a 25 600 kg CO_{2e}. Podlahové vrstvy dopĺňajú cementové potery s hodnotou 19 500 kg CO_{2e} a rýchloschnúce potery s príspevkom 3 470 kg CO_{2e}. Zvislé konštrukcie a murivo sú v tomto scenári reprezentované najmä pálenými keramickými materiálmi. Obvodové a vnútorné nosné steny z keramických tvárnic vykazujú fosílnu emisiu vo výške 27 800 a 11 600 kg CO_{2e}. Priečkové murivo z dutých tehál pridáva záťaž na úrovni 1630 kg CO_{2e}. Na úpravu povrchov týchto konštrukcií je uvažovaná tradičná vápennocementová omietka, ktorá v rámci materiálnej fázy generuje stopu 10100 kg CO_{2e}. V Scenári 1 je aplikovaná kombinácia tradičných a alternatívnych

izolačných materiálov. Do konštrukcie šikmej strechy a stien je navrhnutá fúkaná celulózová izolácia s veľmi nízkou stopou fosílného GWP. Dopĺňa ich izolácia z drevovláknitých dosiek s minimálnym príspevkom 41,3 kg CO_{2e}. Na ploché strechy je navrhnutá kamenná minerálna vlna s príspevkom 7 830 kg CO_{2e} a izolácia z extrudovaného polystyrénu (XPS) predstavuje stopu 3 230 kg CO_{2e}. Asfaltové hydroizolačné pásy vykazujú zhodný príspevok 507 kg CO_{2e} na jednu položku. Kovové a oceliarske výrobky tvoria dôležitú súčasť mechanickej stability a architektúry objektu. Konštrukčná výstuž s 97 % podielom recyklovaného obsahu má hlavný príspevok vo výške 3 990 kg CO_{2e}. Trapézové plechy pre strešné a stropné systémy generujú emisie na úrovni 4 240 kg CO_{2e} a štrukturálne oceľové prvky pridávajú 922 kg CO_{2e}. Výplne otvorov reprezentujú plast-hliníkové okná s trojitým zasklením (7 880 kg CO_{2e}) a hliníkové dvere (721 kg CO_{2e}). Z interiérových prvkov vykazujú najväčšiu stopu presklené drevené dvere (6 820 kg CO_{2e}) a laminátové podlahové krytiny (1 810 kg CO_{2e}). Podiel emisií materiálov v percentách je zobrazený na obrázku 5.13.



Obr. 6.5 Analýza materiálov s najväčším environmentálnym vplyvom v percentách

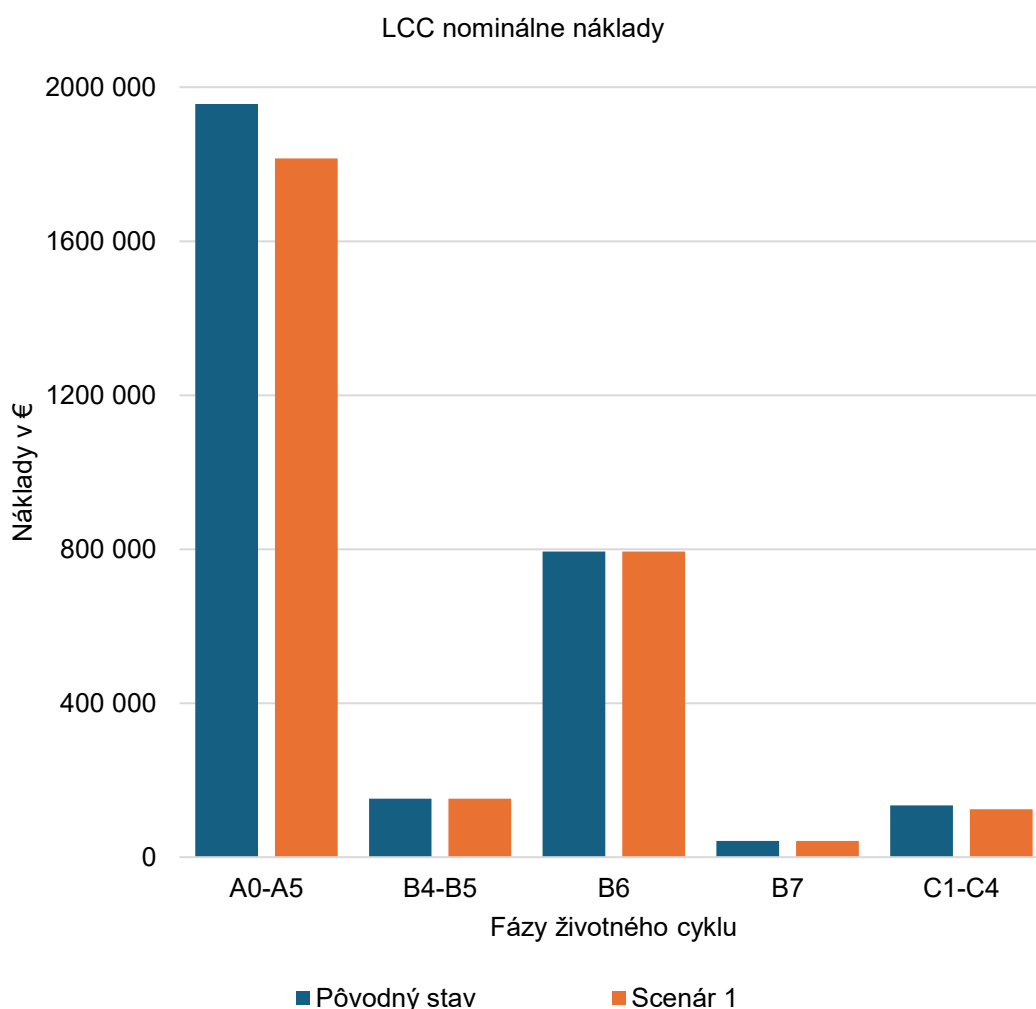
6.2.3 Vyhodnotenie rozdielov pôvodného stavu a scenára 1

V tejto kapitole je analyzovaný pôvodný stav a navrhovaný dekarbonizačný Scenár 1 kultúrneho domu. Tento scenár reprezentuje optimalizovaný stav kultúrneho domu po aplikácii stavebno-technických a technologických opatrení zameraných na zníženie emisií skleníkových plynov.

Celkový potenciál globálneho otepľovania (GWP-celkový) klesol v Scenári 1 na hodnotu 2412,68 kg CO_{2e}/m² (súčet všetkých fáz vrátane modulu D), čo predstavuje zníženie uhlíkovej stopy o zhruba 50 % v porovnaní s pôvodným stavom (4873,32 kg CO_{2e}/m²). Z pohľadu materiálového zloženia emisií zostáva dominantnou fosílna zložka (GWP-fosílny = 2 411,35 kg CO_{2e}/m² vo fázach A-C), zatiaľ čo biogénny uhlík (GWP-biogénny = 9,70 kg CO_{2e bio}/m²) a emisie LULUC (1,66 kg CO_{2e}) z hľadiska celkových výsledkov sú nízke. Najzásadnejší posun na strane materiálov nastal vo výrobnej fáze A1–A3, kde hodnota GWP-celkový klesla z pôvodných 3 489,06 kg CO_{2e}/m² na 1 497,43 kg CO_{2e}/m². Tento pokles o viac ako polovicu jasne indikuje, že v modeli došlo k optimalizácii materiálovej základne. Fáza dopravy na stavenisko (A4) zostala prakticky identická s pôvodným stavom na úrovni 158,17 kg CO_{2e}, čo indikuje stabilné prepravné vzdialenosti a hmotnosti materiálov. Výrazný pokles však nastal v module A5 (inštalácia/výstavba), kde emisie klesli z pôvodných 152,53 kg CO_{2e}/m² na 71,90 kg CO_{2e}/m². Tento takmer 50% pokles v module A5 poukazuje na efektívnejší manažment staveniska, zníženie tvorby stavebného odpadu priamo pri realizácii alebo na technologicky menej náročnú montáž nových prvkov (napr. suchá výstavba namiesto mokrých procesov). Fáza užívania vykazuje stabilné hodnoty pri bežnej údržbe a obnove (B4–B5 ostáva na hodnote 22,06 kg CO_{2e}/m² a prevádzková voda B7 na 1,59 kg CO_{2e}/m²). Scenár 1 sa zameral primárne na materiálovú optimalizáciu a zníženie zabudovaného uhlíka (A1–A3), pričom energetický manažment budovy a jej obalové konštrukcie z hľadiska prestupu tepla zatiaľ zostali na pôvodnej úrovni v modeli B6. Fáza dekonštrukcie a konca životnosti budovy (C1–C4) zaznamenala mierny nárast na 84,71 kg CO_{2e}/m² (oproti pôvodným 77,43 kg CO_{2e}/m²), čo je spôsobené pridaním nových vrstiev a materiálov, ktoré bude potrebné po skončení životnosti demontovať a spracovať. Zaujímavý je posun v kategórii GWP-biogénny v module C1–C4, ktorý stúpol na 13,29 kg CO_{2e}/m². To potvrdzuje, že v Scenári 1 boli použité materiály s biogénnym charakterom (drevo, celulóza), ktoré pri likvidácii na konci životného cyklu uvoľňujú viazaný CO₂ späť do ovzdušia. Environmentálny benefit v module D mierne poklesol na hodnotu -307,08 kg CO_{2e}/m² (oproti pôvodným -345,80 kg CO_{2e}/m²). Stále však predstavuje veľký úsporný kredit a dokazuje, že novo navrhnuté konštrukcie sú dobre recyklovateľné a po skončení životnosti budovy nahradia primárne suroviny. Záporné hodnoty v oboch prípadoch predstavujú čistý environmentálny benefit za vysokú mieru recyklovateľnosti použitých surovín (najmä kovov a minerálnych recyklátov), ktoré po skončení životnosti kultúrneho domu dokážu plnohodnotne nahradiť primárne zdroje v iných projektoch.

6.2.4 Vyhodnotenie nákladov na životný cyklus

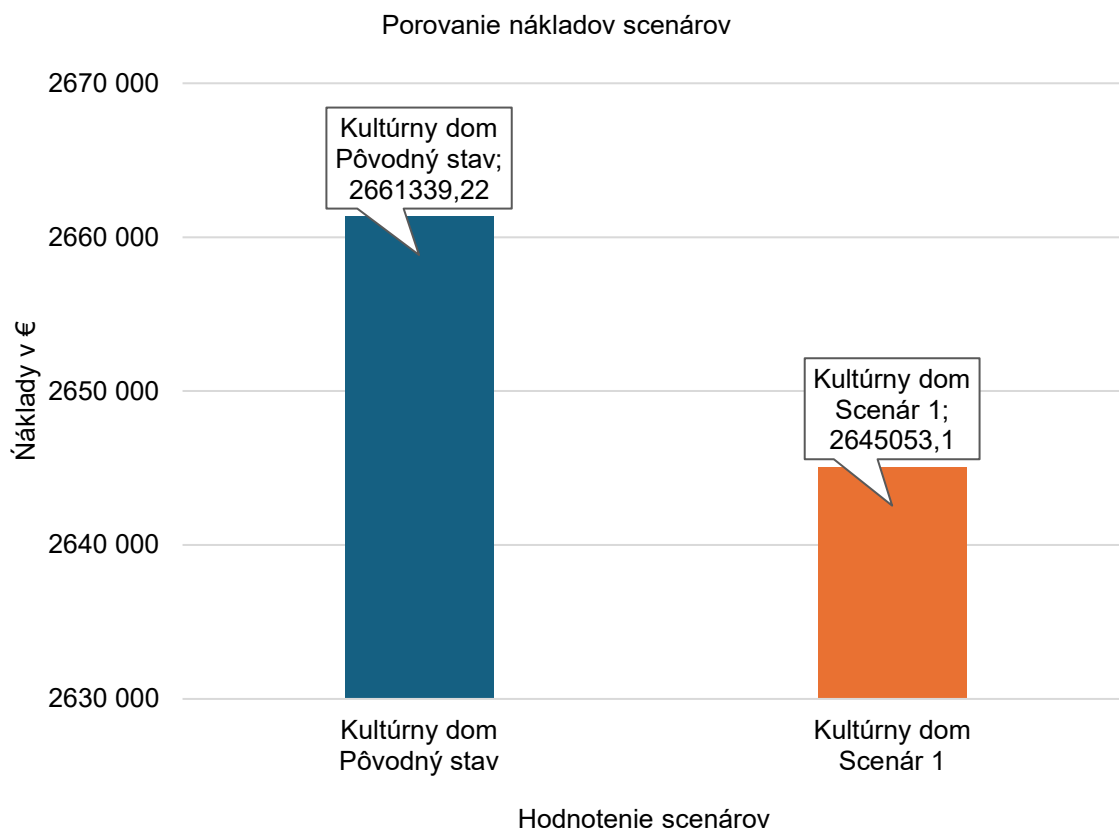
Hodnotenie nákladov životného cyklu (LCC) pre pôvodný stav a navrhovaný Scenár 1 poskytuje dôležitý pohľad na finančnú efektivitu navrhnutých úprav. Táto porovnávací analýza overuje, ako materiálové zmeny navrhnuté v Scenári 1 ovplyvňujú celkovú dlhodobú nákladovú štruktúru kultúrneho domu. Celkové nominálne náklady životného cyklu klesli z pôvodných 3 078 794 € na 2 928 239 €, čo v sumáre predstavuje čistú úsporu 150 555 €. Podrobné porovnanie finančných hodnôt je zobrazené na obrázku 6.6.



Obr. 6.6 Výsledky LCC pre analyzované scenáre kultúrneho domu

V rámci počiatočných investičných nákladov, ktoré zahŕňajú nákup materiálov, dopravu a stavebno-montážne práce (moduly A0–A5), došlo v Scenári 1 k poklesu o 140 977 € (z pôvodných 1 956 294 € na 1 815 317 €). Tento pokles nákladov je priamym dôsledkom dekarbonizačnej stratégie zameranej na opätovné využitie existujúcich stavebných konštrukcií. Finančné dáta tak dokazujú, že maximalizácia zachovania pôvodného masívneho skeletu a základov prináša významný ekonomický benefit, pretože projekt nemusí alokovať kapitál na nákup a montáž nových nosných surovín. Priebežné náklady na cyklickú obnovu stavebných prvkov (B4–B5 = 152 142,70 €) a výdavky na prevádzkovú spotrebu vody (B7 = 41 990,64 €) zostali v oboch hodnotených modeloch úplne identické. Rovnaký stav nastal aj pri prevádzkovej energii (B6), kde náklady v oboch prípadoch dosahujú hodnotu 794 068,40 €. Tento výsledok má zásadný význam pre celkovú stratégiu dekarbonizácie. Potvrdzuje, že Scenár 1 bol koncipovaný výhradne ako materiálová optimalizácia (zníženie zabudovaného uhlíka). Úspora dosiahnutá v počiatočnej investícii (A0–A5) preto slúži ako voľný investičný kapitál, ktorý by mal byť v ďalších fázach projektu nasmerovaný do hĺbkového zateplenia a integrácie obnoviteľných zdrojov energie, aby sa eliminovala táto permanentná finančná záťaž. Náklady spojené s dekonštrukciou, demoláciou a spracovaním stavebného odpadu na konci životného cyklu (moduly C1–C4) zaznamenali v Scenári 1 pokles o 9 678 € (zo 134 298,30 €

na 124 620,30 €). Tento finančný pokles indikuje, že novo navrhnuté materiálové zloženie a stavebné postupy zjednodušujú budúcu demontáž a separáciu materiálov. Lepšia recyklovateľnosť navrhnutých konštrukcií tak v dlhodobom horizonte znižuje poplatky za skládkovanie a finálne spracovanie sutiny.



Obr. 6.7 Výsledky celkových nákladov pre analyzované scenáre kultúrneho domu

Porovnanie LCC modelov preukázalo, že materiálová optimalizácia a rešpektovanie zabudovaného uhlíka v pôvodných konštrukciách sú finančne výhodné už od počiatočnej fázy realizácie. Pre celkovú udržateľnosť kultúrneho domu je však Scenár 1 potrebné vnímať ako prvý krok dekarbonizácie, ktorý musí byť nasledovaný zásadnými opatreniami v module B6, aby sa dosiahol optimálny balans medzi nízkou uhlíkovou stopou a minimálnymi prevádzkovými nákladmi budovy.

6.2.5 Výsledky, diskusia a komplexné zhodnotenie scenárov

Záverečné porovnanie oboch modelov v rámci dekarbonizácie potvrdzuje, že hoci obidva prístupy zhodne zachovávajú vysokú prevádzkovú náročnosť pôvodného stavu v module B6 (keďže Scenár 1 sa primárne nesústreďoval na energetický manažment, ale na materiálovú transformáciu), navrhovaný Scenár 1 dosahuje signifikantne vyššiu úroveň environmentálnej a ekonomickej excelentnosti v oblasti zabudovaného uhlíka a počiatočných nákladov. Použitie progresívnych cementových zmesí s vysokým podielom vysokopečnej trosky a integrácia fúkaných celulózových izolácií účinne tlmiť negatívne dopady výroby a ukladajú biogénny uhlík priamo do telesa budovy. Z hľadiska dlhodobých cieľov dekarbonizácie stavebného sektora na Slovensku sa preto implementácia postupov zo Scenára 1 javí ako progresívne riešenie pre udržateľnú obnovu verejnej infraštruktúry. Komplexné posúdenie dekarbonizačného a ekonomického potenciálu obnovy budovy kultúrneho domu prebiehalo formou komparácie

dvoch základných stavov: pôvodného stavu objektu (Rekonštrukcia) a optimalizovaného Scenáru 1. Hlavný prínos analýzy spočíva v podrobnom rozbere viazanej uhlíkovej stopy stavebných konštrukcií a v nákladoch ich životného cyklu (LCC) v rámci hodnotiaceho obdobia. Z hľadiska dekarbonizácie a indikátorov GWP odhaľujú výsledky zásadné synergie medzi ekologickou voľbou materiálov, rešpektovaním existujúcich konštrukcií a úsporou emisií skleníkových plynov.

Vo výrobnnej fáze (moduly A1-A3) vykazuje pôvodný stav emisie na úrovni 3 489,06 kg CO_{2e}. V Scenári 1 sa vďaka zachovaniu nosného skeletu a výmene materiálov za nízkouhlíkové alternatívy (betón triedy C25/30 s 75 % podielom GGBS trosky a cementy pri triede C30/37) podarilo túto hodnotu znížiť na 1497,43 kg CO_{2e}. To predstavuje úsporu zabudovaného uhlíka o 57,1 % ešte pred zohľadnením prevádzky. Environmentálny benefit Scenáru 1 dopĺňa integrácia fúkanej celulózy v šikmej streche a stenách, čo sa prejavuje v kategórii biogénneho otepľovania (GWP-biogénny), kde fixácia atmosférického uhlíka vo výrobnnej fáze dosahuje zápornú hodnotu -4,30 kg CO_{2e}/m². Hoci sa časť tohto viazaného uhlíka uvoľňuje vo fáze konca životnosti budovy (C1–C4), kedy Scenár 1 vykazuje biogénne emisie 13,29 kg CO_{2e bio}/m² oproti pôvodným 5,98 kg CO_{2e bio}/m², celková bilancia životného cyklu hovorí v prospech navrhovaného riešenia. V konečnom zúčtovaní vrátane započítania recyklačného kreditu v module D totiž Scenár 1 prináša čistú úsporu 2 460,89 kg CO_{2e} za celý životný cyklus budovy, čo znamená pokles celkovej uhlíkovej stopy o zhruba 50,5 % (z 4 873,32 na 2 412,43 kg CO_{2e}). Smerovanie k princípom cirkulárnej ekonomiky potvrdzujú prínosy mimo hraníc systému v module D, kde Scenár 1 generuje pre budúce generácie environmentálny kredit na úrovni -307,08 kg CO_{2e}. Ekonomické hodnotenie nákladov životného cyklu (LCC) prináša do analýzy kľúčový argument finančnej udržateľnosti tohto dekarbonizačného prístupu. V stavebnej praxi sa bežne očakáva, že ekologizácia materiálov zvýši počiatočné investície. Pri tomto objekte však zachovanie pôvodného stavu budovy z dlhodobého hľadiska reprezentuje neefektívne ekonomické zaťaženie. Realizácia obnovy v navrhovanom Scenári 1 si totiž vyžiadala počiatočné stavebné náklady (moduly A0–A5) na úrovni 1 815 317 €, zatiaľ čo pôvodný referenčný model uvažoval s hodnotou až 1 956 294 €. Tento výrazný pokles vstupných investícií o 140 977 € (približne 7,2 %) jednoznačne dokazuje finančnú opodstatnenosť dekarbonizácie formou rekonštrukcie: eliminácia potreby kompletnej demolácie a následnej výstavby nových masívnych nosných konštrukcií z primárnych surovín ušetrila obrovské množstvo finančných prostriedkov aj emisií zároveň. Finančné zaťaženie vo fáze užívania z hľadiska periodickej obnovy a opráv komponentov (moduly B4-B5) zostalo v oboch scenároch stabilizované na identickej hodnote 152 142,70 €, rovnako ako výdavky na prevádzkovú vodu v module B7 (41 990,64 €). Absolútnym ekonomickým jadrom fázy užívania však zostáva modul B6 (prevádzková energia), ktorý v oboch prípadoch zhodne zaťažuje rozpočet sumou 794 068,38 €. Tento ekonomický ukazovateľ jasne demonštruje limity Scenáru 1 a potvrdzuje, že finančné prostriedky ušetrené v realizačnej fáze (A0-A5) vo výške takmer 141-tisíc eur poskytujú ideálny investičný kapitál, ktorý musí byť v nadväzujúcom Scenári 2 investovaný do energetických opatrení (OZE a zateplenie obalu) s cieľom eliminovať túto takmer 800-tisícovú permanentnú prevádzkovú stratu. Fáza konca životnosti (moduly C1-C4) už rozpočty ovplyvňuje v menšej miere. Scenár 1 si v nej vyžaduje 124 620,27 €, čo je menej ako v pôvodnom stave (134 293,97 €). Tento pokles priamo súvisí s lepšou demontovateľnosťou, selektívnou likvidáciou a vyšším recyklačným potenciálom novo navrhnutých konštrukčných vrstiev. V celkovom sumáre nominálnych nákladov životného cyklu (LCC) tak Scenár 1 predstavuje ekonomicky optimálnu alternatívu s celkovými nákladmi 2 928 138,99 € oproti

pôvodným 3 078 793,97 €, čím samospráve prináša celkovú finančnú úsporu 150 555 € pri súčasnom masívnom polovičnom znížení environmentálneho dopadu na klímu.

6.2.6 Diskusia

Kľúčovým bodom na diskusiu je výrazný úspech Scenáru 1 v znížení zabudovaného uhlíka vo výrobnej fáze (A1-A3) o viac ako polovicu. Tento pokles jasne demonštruje, že najúčinnnejším dekarbonizačným nástrojom pri obnove fondu budov nie je samotná aplikácia nových "bio-materiálov", ale v prvom rade rešpektovanie a maximálne zachovanie existujúcej materiálovej substancie budovy. Keďže emisie pôvodného nosného systému a základov kultúrneho domu už boli v minulosti uvoľnené, ich integrácia do nového životného cyklu namiesto demolácie predstavuje okamžitú úsporu tisícov kilogramov fosílného CO_{2e}. Tento prístup je v súlade s princípmi obehového hospodárstva a ukazuje, kde by mali samosprávy hľadať primárne environmentálne úspory pri plánovaní rekonštrukcií. Zároveň je však potrebné kriticky poukázať na slabé miesto Scenáru 1, ktorým je absencia energetických úspor v module B6 (prevádzková energia). To, že emisie a náklady na prevádzku zostali úplne identické s pôvodným energeticky neefektívnym stavom, otvára diskusiu o systémovom prístupe k fázam obnovy. V praxi sa často stáva, že kvôli obmedzeným rozpočtom alebo nesprávnemu manažmentu projektov dôjde len k čiastočným úpravám. Výsledky tejto štúdie exaktne dokazujú, že hoci materiálová dekarbonizácia (fázy A) dokáže znížiť globálnu stopu životného cyklu o polovicu, bez následného zásahu do energetických systémov budovy (zateplenie, prechod na OZE) zostáva potenciál budovy z hľadiska dlhodobej udržateľnosti otvorený. Z hľadiska ekonomického hodnotenia LCC výsledky búrajú zažitý mýtus, že environmentálne uvedomelé stavebné postupy automaticky predražujú počiatočnú realizáciu. Pokles investičných nákladov v moduloch A0-A5 o viac než 140-tisíc eur v Scenári 1 jasne ukazuje, že sanácia a adaptácia pôvodných konštrukcií je finančne výhodnejšia než konvenčný prístup spojený s kompletným búraním a novou výstavbou. Tento ušetrený kapitál navyše v diskusii slúži ako kľúčový argument pre obhajobu nadväzujúcich fáz projektu. Posledným dôležitým aspektom na diskusiu je správanie sa biogénneho uhlíka na konci životného cyklu (moduly C1-C4). Hoci použitie prírodnej celulózovej izolácie v Scenári 1 prináša benefit vo forme viazania atmosférického uhlíka počas rastu biomasy a znižuje fosílny GWP vo fáze výroby, dáta ukazujú nárast emisií pri dekonštrukcii (13,29 kg CO_{2e}/m²). Aby bol benefit bio-materiálov skutočne stopercentný, je nevyhnutné, aby tieto materiály po skončení životnosti budovy nekončili na skládkach (kde pri rozklade uvoľňujú skleníkové plyny), ale boli opätovne materiálovo zhodnotené alebo energeticky transformované s využitím moderných technológií, čo v modeli potvrdzuje aj vysoký recyklačný kredit v module D.

7 Rozšírenie vzdelávacích kapacít základnej školy -analýza dekarbonizačného potenciálu a ekonomických aspektov

Hlavným cieľom tejto kapitoly je komplexná environmentálna a ekonomická analýza rozšírenia vzdelávacích kapacít základnej školy prostredníctvom prístavby. Prípadová štúdia poskytuje komplexnú kvantifikáciu dekarbonizačného potenciálu v prevádzkovej aj viazanej fáze životného cyklu budovy a súčasne hodnotí ekonomickú efektívnosť a návratnosť investovaných prostriedkov z pohľadu dlhodobej udržateľnosti investície.

7.1 Inventarizačná analýza

Analýza inventarizácie životného cyklu (LCI) bola použitá na výpočet uhlíkovej stopy a ďalších environmentálnych indikátorov počas celého životného cyklu oboch navrhovaných scenárov rekonštrukcie základnej školy. Skladby stavebných konštrukcií (obvodového plášťa, strechy a otvorových konštrukcií) boli v oboch modeloch navrhnuté a optimalizované tak, aby po rekonštrukcii bezpečne spĺňali prísne tepelno-technické požiadavky na súčiniteľ prechodu tepla (U) a tepelný odpor (R) v zmysle normy STN 73 0540-2+Z1+Z2 [12] pre obnovu budov.

Architektonicko-konštrukčná a materiálová charakteristika pôvodného stavu objektu

Podkladom pre podrobnú analýzu stavebno-technického stavu budovy základnej školy sú projektová dokumentácia a technické výpisy prvkov. Rozšírenie kapacít ZŠ Novot' o novostavbu základnej školy je riešené ako samostatný trojpodlažný objekt hybridnej konštrukcie v pôdorysnom tvare T so sedlovou strechou. Objekt pozostáva z dvoch konštrukčných celkov - drevenej časti tvorenej z CLT panelov a murovanej časti. Funkčné prepojenie s existujúcim areálom školy je zabezpečené prostredníctvom existujúcich krytých vonkajších chodníkov. Stavba pozostáva z dvoch konštrukčných celkov – murovanej časti a drevostavby.

Vertikálne nosné a výplňové konštrukcie

- Murovaná časť: Nosný systém murovanej časti je tvorený obojsmerným stenovým systémom z pórobetónových tvárnic s pevnosťou v tlaku min. 2,32 MPa, spájaných na tenko vrstvovú lepiacu maltu celoplošne. Hrúbka obvodových nosných stien je 250 – 300 mm, vnútorných nosných stien 250 – 300 mm a nenosných deliacich priečok 100 – 150 mm. Ponad otvory v nosných stenách sú osadené prefabrikované preklady (výšky 250 mm). V miestach väčších namáhání sú navrhnuté železobetónové prievlaky rôznych výšok. Účinky vetra preberajú stužujúce steny a železobetónové jadro výťahu s hrúbkou stien min. 200 mm.
- Drevostavba - CLT panely: Nosná zvislá konštrukcia drevostavby na všetkých nadzemných podlažiach je vyhotovená z veľkoplošných krížom lepených drevených panelov CLT hrúbky 120 mm (5-vrstvé, CLT-C5s 30+20+20+20+30) a 140 mm (5-vrstvé, CLT-C5s 40+20+20+20+40). Nosný systém je doplnený o priebežné stĺpy z lepeného lamelového dreva BSH profilu 160/400 mm triedy pevnosti GL24h. Jednotlivé prvky panelov sú zlepené plošne aj na bočných hranách PU lepidlom triedy D4. Schodisko je navrhované ako dvojramenné, železobetónové s hrúbkou dosky 200 mm. Šírka ramena je 1500mm. Schodisko je uložená na stropnú dosku, resp. podestu a prievlaky.

Horizontálne konštrukcie a stropné systémy

- Murovaná časť: Stropná konštrukcia nad nadzemnými podlažiami murovanej časti je navrhnutá ako železobetónová stropná doska hrúbky 150 mm, vystužená ako spojité na vnútornú a obvodovú nosné steny, resp. uložená na prievlaky. Murivo je v úrovni stropu spriahnuté železobetónovým vencom.
- Drevostavba - CLT stropy: Stropy drevostavby sú riešené z CLT panelov hrúbky 260 mm, 7-vrstvé (CLT-L7s-2: $2 \times 40 + 30 + 40 + 30 + 2 \times 40$), spojované na polodrážku v kombinácii so skrutkami. Stropy sú doplnené drevenými prekladmi v mieste otvorov, spriahnutými celozávitovými skrutkami. Schodiskové panely CLT hrúbky 180 mm sú 7-vrstvové (CLT-C7s $30 + 20 + 30 + 20 + 30 + 20 + 30$).
- Skladba podlahových vrstiev (interiér): Na nadzemných podlažiach drevostavby je nosným prvkom CLT panel, na ktorom je uložená kročajová izolácia z kamennej vlny hrúbky 30 mm doplnená voštinovým zásypom hrúbky 30 mm, nasleduje roznášacia vrstva zo sadrovláknej dosky hrúbky 12 mm, PE fólia a betónový poter hrúbky 50 mm. Na nadzemnom podlaží murovanej časti (P4) je nosným prvkom železobetónová stropná doska hrúbky 150 mm. Na nej je uložená tepelná izolácia z EPS 150 S hrúbky 90 mm, PE fólia a betónový poter hrúbky 60 mm. Finálnu nášľapnú vrstvu tvorí podlahová krytina hrúbky 20 mm.

V hygienických priestoroch a miestnosti pre upratovačku tvorí finálnu nášľapnú vrstvu keramická protišmyková podlaha. V ostatných miestnostiach tvorí finálnu nášľapnú vrstvu podlahová krytina na báze PVC s hrúbkou 2 mm, fixovaná lepením.

Strešný plášť a strešná konštrukcia

Objekt je zastrešený dvoma typmi strešných konštrukcií v závislosti od konštrukčného celku - sedlovou strechou nad drevostavbou a plochou strechou nad murovanou časťou.

- Nosná konštrukcia sedlovej strechy je tvorená drevenými priehradovými väzníkmi z reziva pevnostnej triedy C24, kotvenými kotviacimi skrutkami, stavebnými klincami a uholníkmi. Strešný plášť je navrhnutý ako difúzne otvorený. Na hornej pásnici priehradového väzníka je uložená difúzne otvorená strešná fólia s TPU membránou, na ktorej je realizované plné debnenie z dosiek hrúbky 25 mm s kontralatovaním 60/40 hrúbky 40 mm a druhá vrstva plného debnenia hrúbky 25 mm. Hydroizolačnú a separačnú funkciu plní drenážna podstrešná fólia so štruktúrovanou rohožou. Finálnu vrstvu tvorí strešná krytina z falcovaného plechu. Tepelnoizolačná vrstva je tvorená fúkanou celulózou hrúbky 450 mm uloženou medzi dolnými pásnicami priehradových väzníkov, doplnenou o parozábranu zo samolepiaceho modifikovaného asfaltového pásu hrúbky 3 mm s penetračným náterom. Strecha je odvádzaná poplastovaným odvodňovacím systémom s predĺžením všetkých vetracích potrubí nad úroveň strešnej roviny.
- Plochá strecha murovanej časti je navrhnutá so spádovou vrstvou na nosnej železobetónovej stropnej doske hrúbky 150 mm. Na doske je realizovaný penetračný náter s primárnou hydroizoláciou z asfaltového pásu. Tepelnoizolačnú vrstvu tvoria izolačné dosky z EPS 150 S s hornou vrstvou v spáde s celkovou hrúbkou 400 – 540 mm. Hydroizolačný systém je ukončený strešnou PVC fóliou oddelenou separačnými geotextíliami 300 g/m². Vrchnú ochrannú vrstvu tvorí štrkovú zásyp hrúbky 50 – 170 mm.

- Vstupný prístrešok je tvorený šiestimi drevenými stĺpmi BSH profilu 160/500 mm z reziva triedy GL24h, ukotvenými do základových konštrukcií. Strechu prístrešku tvorí jeden CLT panel hrúbky 260 mm, 7-vrstvový (CLT-L7s-2), s navrhnutou extenzívnou zeleňou.

Otvorové konštrukcie (Výplne otvorov)

- Fasádne okenné konštrukcie: Všetky okenné výplne fasády využívajú jednotnú materiálovú bázu - drevo hliníkové rámy s hĺbkou 110 mm s hodnotou súčiniteľa prechodu tepla rámu $U_f = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Zasklenie je realizované izolačným trojsklom s hodnotou $U_g = 0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$ s nekovovým dištančným profilom. Okenné otvory sú osadené dvojkrídlovými a trojkrídlovými oknami podľa umiestnenia a funkcie na jednotlivých podlažiach.
- Vstupné a interiérové dvere: Exteriérové vstupné dvere sú navrhnuté ako drevohliníkové s izolačným trojsklom VSG, opatrené nerezovým madlom na celú výšku dverí, otváracie do exteriéru, osadené na rozširovacích profiloch. Interiérové dverné konštrukcie sú navrhnuté v dvoch základných typoch. Plné rámové dvere sú osadené v obložkových zárubniach s povrchovou úpravou HPL 0,8 mm a hranatým rozetovým kovaním. Presklené dverné zostavy využívajú drevený rám z dubu s povrchovou úpravou tvrdým voskovým olejom a výplňou z bezpečnostného číreho skla s okrasným pieskovaním. Kovanie presklených zostáv je nerezové madlo, prípadne rozetové hranaté. Vybrané zostavy sú vybavené automatickým zatváraním s hornou montážou na klznej lište, stavačmi dverí a padacím prahom. Dverná zostava D5 je navrhnutá s požiarou odolnosťou EI30/D3-C s dverným koordinátorom a kovaním pasívneho krídla podľa STN EN 179. Farebnosť rámov plných dverí bude upresnená investorom. Vstupná presklená zostava D1 je osadená na rozširovacom profile v podhlade a stenách.

Zateplenie obvodového plášťa a základov (Systém ETICS)

Všetky zateplňovacie vrstvy obvodového plášťa sú navrhnuté s cieľom dosiahnuť požadované tepelnotechnické vlastnosti budovy v súlade s normou STN 73 0540-2+Z1+Z2.

- Zateplenie obvodovej steny: Obvodový plášť drevostavby je zateplený fasádnymi doskami z kamennej vlny hrúbky 240 mm kotvenými disperzným lepidlom na CLT panel hrúbky 120 mm. Povrchová úprava fasády je realizovaná dvoma vrstvami lepiaco-stierkovacej hmoty so sklotextilnou mriežkou, penetračným náterom a silikónovou fasádnou omietkou. Obvodový plášť murovanej časti je riešený ako odvetraná fasáda s hliníkovým alebo oceľovým profilovaným prvkom. Na murivo z pórobetónových tvárnic hrúbky 300 mm s vnútornou vápenno-cementovou omietkou je kotvená tepelná izolácia z kamennej vlny hrúbky 200 mm s odvetrávanou medzerou hrúbky 40 mm a fasádnou fóliou. Obvodový plášť susednej budovy (ST4) je zateplený kamennou vlnou hrúbky 100 mm, ktorá je kotvená do pórobetónových tvárnic hrúbky 300 mm.
- Zateplenie základov a sokla: Zateplenie soklovej časti a základov je realizované fasádnymi doskami z XPS hrúbky 150 mm, doplnenými o zvislú hydroizoláciu z hrubovrstvej bitúmenovej stierky s penetračným náterom na železobetónovú stenu hrúbky 300 mm. Soklová časť je ukončená povrchovou úpravou zhodnou s fasádou - dvojvrstvou lepiaco-stierkovacej hmoty so sklotextilnou mriežkou, penetračným náterom a silikónovou fasádnou omietkou.

Tab. 7.1 Výmena materiálov oproti pôvodnému modelu

Model obvodovej steny	Skladba vrstiev (zvnútra von)	R [m ² ·K/W]	U [W/m ² ·K]
Pôvodná skladba	Vápenná omietka (15) + Keramická tehla (375) + Minerálna vlna (160) + Omietka	5,85	0,17
Model 1: Drevovláknitý ETICS	Vápenná omietka (15) + Tehla (375) + Drevovláknitá doska (200) + Silikátová omietka	6,65	0,15
Model 2: Prevetrávaná fasáda	Vápenná omietka (15) + Tehla (375) + Fúkané drevovlákno (200) + Drevovláknitá doska (60) + Vzd. medzera (40) + Drevený obklad (20)	8,25	0,12
Model strechy	Skladba vrstiev (z interiéru von)	R [m ² ·K/W]	U [W/m ² ·K]
Pôvodný Projekt	SDK (12,5) + Parozábrana + Sklená vlna (200) + Debnenie (25) + Falcovaný plech	5,35	0,19
Model 1: Fúkané drevovlákno	SDK (12,5) + Parozábrana + Fúkané drevovlákno (400) + Debnenie (25) + Falcovaný plech	10,25	0,1
Model 2: Fúkaná celulóza	SDK (12,5) + Parozábrana + Fúkaná celulóza (400) + Debnenie (25) + Falcovaný plech	10,75	0,09

7.2 Analýza vplyvov na životné prostredie

V rámci fázy hodnotenia vplyvov na životné prostredie (LCIA) boli vyhodnotené všetky inventarizačné dáta zhromaždené pre dva navrhované modely komplexnej obnovy budovy základnej školy. Zvolený prístup LCA posudzoval viaceré kategórie environmentálnych vplyvov v prísnom súlade s európskou normou EN 15804+A2. Prehľad hodnotených kategórií vplyvov je uvedený v tabuľke 7.2. Tieto kategórie boli na účely podrobnejšej interpretácie rozdelené na globálne, regionálne a lokálne.

Tab. 7.2 Parametre popisujúce základné vplyvy na životné prostredie

Kategória vplyvu	Skratka	Jednotka
Potenciál globálneho otepľovania – celkový	GWP-celkový	kg CO _{2e}
Potenciál globálneho otepľovania – fosílny	GWP-fosílny	kg CO _{2e}
Potenciál globálneho otepľovania – biogénny	GWP-biogénny	kg CO _{2 bio}
Potenciál globálneho otepľovania – využitie krajiny a zmena využitia krajiny	GWP-LULUC	kg CO _{2e}
Potenciál úbytku stratosférickej ozónovej vrstvy	ODP	kg CFC 11 _e
Potenciál acidifikácie (okysľovania) pôdy a vody	AP	mol H ⁺ _e
Potenciál eutrofizácie pre sladkovodné prostredie	EP-AF	kg P _e
Potenciál eutrofizácie pre morské prostredie	EP-AM	kg N _e
Potenciál terestrickej (suchozemskej) eutrofizácie	EP-T	mol N _e

Potenciál tvorby troposférického ozónu	POCP	kg NMVOC _e
Potenciál úbytku abiotických surovín pre nefosílnu zdroj	ADP-E	kg Sb _e
Potenciál úbytku abiotických surovín pre fosílnu zdroj	ADP-FF	MJ
Potenciál nedostatku vody	WD	m ³

7.2.1 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Pôvodný stav)

Prehľadná kvantitatívna analýza životného cyklu (LCA) odhaľuje distribúciu environmentálnej záťaže v jednotlivých fázach. Hodnotenú sú primárne kategórie vplyvu: GWP, AP, EP, POCP a ADP.

Globálne ukazovatele

Indikátor GWP vyjadruje celkovú produkciu skleníkových plynov prepočítanú na ekvivalent oxidu uhličitého (kg CO_{2e}/m²). Výsledky na 1 m² podlahovej plochy poskytujú presnejší pohľad na intenzitu skleníkových efektov v jednotlivých etapách životného cyklu novostavby základnej školy.

Z hľadiska globálneho potenciálu otepľovania (GWP-celkový) vyjadreného v merných jednotkách kg CO_{2e}/m² dominuje prevádzková fáza spotreby energie. Modul B6, zahŕňajúci spotrebu energie na vykurovanie a prevádzku, generuje 11 140,68 kg CO_{2e}/m². Druhým najvýznamnejším príspevkom je priebežná obnova a údržba materiálov počas životného cyklu (Moduly B4-B5) s hodnotou 145,12 kg CO_{2e}/m², nasledovaná procesmi spojenými s výstavbou a inštaláciou (Modul A5) s hodnotou 73,87 kg CO_{2e}/m². Priamy odber vody počas prevádzky školy (Modul B7) prispieva hodnotou 30,46 kg CO_{2e}/m² a preprava materiálov na stavenisko (Modul A4) pridáva 9,81 kg CO_{2e}/m². Fáza výroby stavebných materiálov (Moduly A1-A3) vykazuje v dôsledku vysokého podielu biogénneho uhlíka viazaného v drevených konštrukciách CLT výnimočne negatívnu hodnotu GWP-celkový na úrovni -15,05 kg CO_{2e}/m². Fáza konca životnosti budovy (Moduly C2-C4) predstavuje zaťaženie 331,61 kg CO_{2e}/m². Potenciálny prínos recyklácie a opätovného použitia konštrukcií mimo hraníc systému (Modul D) vykazuje úsporu -232,98 kg CO_{2e}/m², čo potvrdzuje vysokú environmentálnu hodnotu hybridnej dreveno-murovacej konštrukcie.

V nadväznosti na GWP-celkový poskytuje segmentácia emisií na fosílnu zložku (GWP-fosílny), biogénnu zložku (GWP-biogénny) a emisie spojené s využívaním krajiny a jej zmenami (GWP-LULUC) detailnejší pohľad na charakter záťaže. Dominantným faktorom fosílnych emisií (GWP-fosílny) je prevádzková fáza B6 s hodnotou 11 139,94 kg CO_{2e}/m². Výrobná fáza stavebných materiálov (Moduly A1-A3) vykazuje fosílnu emisie 293,95 kg CO_{2e}/m², avšak biogénna zložka (GWP-biogénny) tejto fázy dosahuje výraznú negatívnu hodnotu -309,85 kg CO_{2e}/m², čo reflektuje rozsiahle využitie CLT panelov a lepeného lamelového dreva - materiálov, ktoré v sebe ukladajú atmosférický uhlík. Biogénne emisie z realizačnej fázy výstavby (Modul A5) dosahujú 1,94 kg CO_{2e}/m². Vo fáze konca životnosti (C3-biogenic) sa absorbovaný biogénny uhlík uvoľňuje späť do prostredia s hodnotou 306,28 kg CO_{2e}/m². Zložka GWP-LULUC vykazuje v celom životnom cykle minimálny vplyv; najvyššiu hodnotu dosahuje vo fáze B4-B5 na úrovni 1,04 kg CO_{2e}/m² a vo výrobnej fáze A1-A3 na úrovni 0,86 kg CO_{2e}/m². Z hľadiska úspor mimo hraníc systému (Modul D) analýza poukazuje na potenciál úspory fosílnych emisií vo výške -219,73 kg CO_{2e}/m², zatiaľ čo biogénna zložka vykazuje -13,22 kg CO_{2e}/m². Z hľadiska indikátora abiotického vyčerpania nerastných surovín (ADP-

E) vykazuje novostavba základnej školy špecifickú distribúciu záťaže. Najvyšší príspevok k vyčerpávaniu prvkov vykazuje výrobná fáza stavebných materiálov (Moduly A1–A3) s hodnotou 164,77 kg Sbe/m², čo súvisí s rozsiahlym využitím ocelevej výstuže a betónových konštrukcií. Fáza C4 prispieva hodnotou 1,22 kg Sbe/m² a realizačná fáza (Modul A5) hodnotou 10,60 kg Sbe/m². Prevádzková fáza B6 vykazuje v tejto kategórii zanedbateľný dopad na úrovni 0,003 kg Sbe/m².

Regionálne ukazovatele

Pri hodnotení regionálnych environmentálnych ukazovateľov novostavby základnej školy dominuje prevádzková fáza spotreby energie (Modul B6) väčšine sledovaných indikátorov. V kategórii AP dosahuje prevádzková fáza B6 hodnotu 51,63 mol H⁺ e/m², zatiaľ čo výrobná fáza materiálov (Moduly A1-A3) prispieva hodnotou 1,21 mol H⁺ e/m². Pri bližšom pohľade na eutrofizáciu, dominuje vo všetkých subtypoch prevádzková fáza B6: EP-AF dosahuje 1,28 kg P e/m², EP-AM 9,23 kg N e/m² a EP-T 97,54 mol N e/m², čo je priamym dôsledkom dlhodobých emisií zo spaľovania palív pri vykurovaní objektu. Výrobná fáza A1-A3 prispieva hodnotami EP-AF 0,17 kg P e/m², EP-AM 0,25 kg N e/m² a EP-T 3,04 mol N e/m². Fáza konca životnosti (Moduly C2-C4) zaťažuje lokálne ekosystémy minimálne. Z hľadiska prínosov a úspor (Modul D) by zhodnotenie konštrukcií po ich dekonštrukcii prinieslo úspory pri acidifikácii vo výške -0,78 mol H⁺ e/m² a pri terestriálnej eutrofizácii -2,16 mol N e/m².

Lokálne ukazovatele

Pri analýze neobnoviteľných energetických zdrojov a celkového vplyvu na hydrosféru vykazuje životný cyklus novostavby základnej školy výraznú závislosť od energetických vstupov v prevádzkovej fáze. V rámci ADP-FF dominuje prevádzková fáza B6 s hodnotou 147 531,01 MJ/m², čo odzrkadľuje energetickú náročnosť prevádzky školskej budovy počas jej životného cyklu. Druhým najväčším spotrebiteľom fosílnych zdrojov je výrobná fáza stavebných materiálov (Moduly A1-A3) na úrovni 2 568,96 MJ/m², pričom priebežná obnova komponentov (Moduly B4–B5) dosahuje 2 141,78 MJ/m² a realizačná fáza (Modul A5) si vyžiadala 864,83 MJ/m². Identický trend dominancie prevádzkového modulu B6 sa prejavuje aj pri indikátore spotreby vody WU, kde nepriamy odber viazaný na energetické procesy dosahuje 78 964,88 m³/m². Spotreba vody vo výrobnej fáze materiálov A1–A3 predstavuje 1 916,20 m³/m² a priebežná obnova komponentov (Moduly B4-B5) odčerpá ďalších 847,47 m³/m². Priamy odber vody počas prevádzky školy žiakmi a personálom (Modul B7) dosahuje 23,77 m³/m². Fáza konca životnosti (C2–C4) zaťažuje oba indikátory len minimálne (215,14 MJ/m² a 24,72 m³/m²). Z hľadiska materiálových úspor mimo hraníc systému (Modul D) analýza preukazuje kompenzačný potenciál; zhodnotenie konštrukčnej bázy dokáže prostrediu vrátiť až -2 721,23 MJ/m² fosílnej energie a -9 418,91 m³/m² spotrebovanej vody.

7.2.2 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Scenár 1)

Globálne ukazovatele

V dekarbonizačnom scenári (Scenár 1) dochádza k významnému presunu a redukcii emisií skleníkových plynov. GWP-celkový vo výrobnej fáze stavebných materiálov (Moduly A1-A3) dosahuje negatívnu hodnotu -163,56 kg CO_{2e}/m², čo reprezentuje čistú sekvestráciu uhlíka viazaného v drevených konštrukčných prvkoch. Prevádzková fáza spotreby energie (Modul B6) zostáva dominantným prispievateľom s hodnotou 11 140,68 kg CO_{2e}/m², čo zdôrazňuje kľúčový potenciál ďalšieho znižovania energetickej náročnosti prevádzky budovy. Priebežná obnova a údržba komponentov (Moduly B4-B5) prispieva hodnotou 209,43 kg CO_{2e}/m²,

realizačná fáza výstavby (Modul A5) hodnotou 72,74 kg CO_{2e}/m² a preprava materiálov (Modul A4) hodnotou 10,10 kg CO_{2e}/m².

Z hľadiska detailnejšej segmentácie GWP tvoria najväčšiu zložku fosílné emisie (GWP-fosílny), ktoré v module prevádzkovej energie B6 dosahujú 11 139,94 kg CO_{2e}/m², zatiaľ čo výrobná fáza materiálov A1–A3 vykazuje fosílné emisie 192,72 kg CO_{2e}/m². Pri biogénnych emisiách (GWP-biogénny) vykazuje fáza materiálov A1–A3 výraznú negatívnu hodnotu -357,47 kg CO_{2e bio}/m², čo predstavuje úspešné dlhodobé uloženie atmosférického uhlíka v CLT paneloch, prvkoch z lepeného lamelového dreva a drevovláknitej izolácii. Čiastočné uvoľnenie biogénneho uhlíka nastáva počas realizačnej fázy (Modul A5) na úrovni 3,84 kg CO_{2e bio}/m², pričom k hlavnému uvoľneniu dochádza na konci životnosti (C3-biogenic) s hodnotou 357,20 kg CO_{2e bio}/m². Emisie GWP-LULUC vykazujú v celom životnom cykle minimálny vplyv, s najvyššou hodnotou vo fáze B4-B5 na úrovni 2,36 kg CO_{2e}/m² a vo výrobnej fáze A1-A3 na úrovni 1,19 kg CO_{2e}/m². Z hľadiska materiálového zhodnotenia a úspor za hranicami systému (Modul D) vykazuje navrhovaný stav výrazný pozitívny prínos vo forme kompenzácie fosílnych emisií -234,40 kg CO_{2e}/m² a biogénnej zložky -64,14 kg CO_{2e}/m², čo je priamym dôsledkom vysokého podielu drevených konštrukcií vstupujúcich do cirkulárneho reťazca. Z hľadiska indikátora abiotického vyčerpania nerastných surovín (ADP-E) dosahuje navrhovaný stav výrazne priaznivejšie výsledky v porovnaní s pôvodným stavom. Výrobná fáza materiálov (Moduly A1–A3) vykazuje hodnotu 9,06 kg Sbe/m², čo je len zlomok hodnoty pôvodného stavu (164,77 kg Sbe/m²). Realizačná fáza (Modul A5) prispieva hodnotou 0,71 kg Sbe/m², priebežná obnova (B4–B5) hodnotou 0,04 kg Sbe/m² a fáza C4 hodnotou 0,11 kg Sbe/m².

Regionálne ukazovatele

Celkové regionálne vyhodnotenie LCA navrhovaného stavu ZŠ Novot' potvrdzuje, že prevádzková fáza zostáva dominantným zdrojom regionálnych vplyvov, zatiaľ čo výrobná fáza materiálov vykazuje mierne nižšie hodnoty vďaka biogénnemu charakteru použitých materiálov. V kategórii AP dosahuje prevádzková fáza B6 hodnotu 51,63 mol H⁺ e/m², zatiaľ čo výrobná fáza materiálov (Moduly A1–A3) prispieva hodnotou 1,04 mol H⁺ e/m². Vo všetkých subtypoch eutrofizácie dominuje prevádzková fáza: EP-AF dosahuje 1,28 kg P e/m², EP-AM 9,23 kg N e/m² a EP-T 97,54 mol N e/m², čo je priamym dôsledkom dlhodobých emisií zo spaľovania palív pri vykurovaní objektu. Výrobná fáza A1–A3 prispieva hodnotami EP-AF 0,16 kg P e/m², EP-AM 0,22 kg N e/m² a EP-T 2,56 mol N e/m². Fáza konca životnosti (Moduly C1–C4) zaťažuje lokálne ekosystémy len minimálne. Z hľadiska prínosov a úspor (Modul D) by zhodnotenie drevených a zmiešaných konštrukcií po ich dekonštrukcii prinieslo úspory pri acidifikácii vo výške -0,89 mol H⁺ e/m² a pri terestriálnej eutrofizácii -2,48 mol N e/m², čo potvrdzuje dlhodobú environmentálnu hodnotu zvoleného konštrukčného systému.

Lokálne ukazovatele

Lokálne ukazovatele ADP-FF a WU odhaľujú, že navrhovaný stav základnej školy vykazuje, podobne ako pôvodný stav, výraznú závislosť od energetických vstupov v prevádzkovej fáze. Hlavným kritickým bodom celého životného cyklu zostáva spotreba fosílnych palív v prevádzkovej fáze B6 s hodnotou 147 531,01 MJ/m² a spotreba vody 78 964,88 m³/m², čo reflektuje energetický mix spotrebúvaný budovou počas jej životného cyklu. Výrobná fáza stavebných materiálov (Moduly A1-A3) predstavuje druhú najvýznamnejšiu záťaž pri spotrebe vody s hodnotou 3 009,11 m³/m², pričom pri spotrebe fosílnych palív dosahuje 2 258,98 MJ/m². Priebežná obnova komponentov (Moduly B4-B5) vykazuje 2 494,11 MJ/m² a 1 495,73 m³/m². Priamy odber vody počas prevádzky školy žiakmi a personálom (Modul B7) má na celkový

cyklus minimálny dopad s hodnotou 23,77 m³/m². Fáza konca životnosti (C1–C4) zaťažuje oba indikátory len zanedbateľne (298,78 MJ/m² a 38,20 m³/m²). Z pohľadu materiálových úspor mimo hraníc systému (Modul D) má navrhovaný stav výrazný kompenzačný potenciál -3 006,38 MJ/m² fosílnkej energie a -10 251,16 m³/m² spotrebovanej vody, čo potvrdzuje, že investícia do drevených konštrukčných systémov prináša dlhodobý synergický prínos v spojení s cirkulárnou ekonomikou na konci životného cyklu budovy.

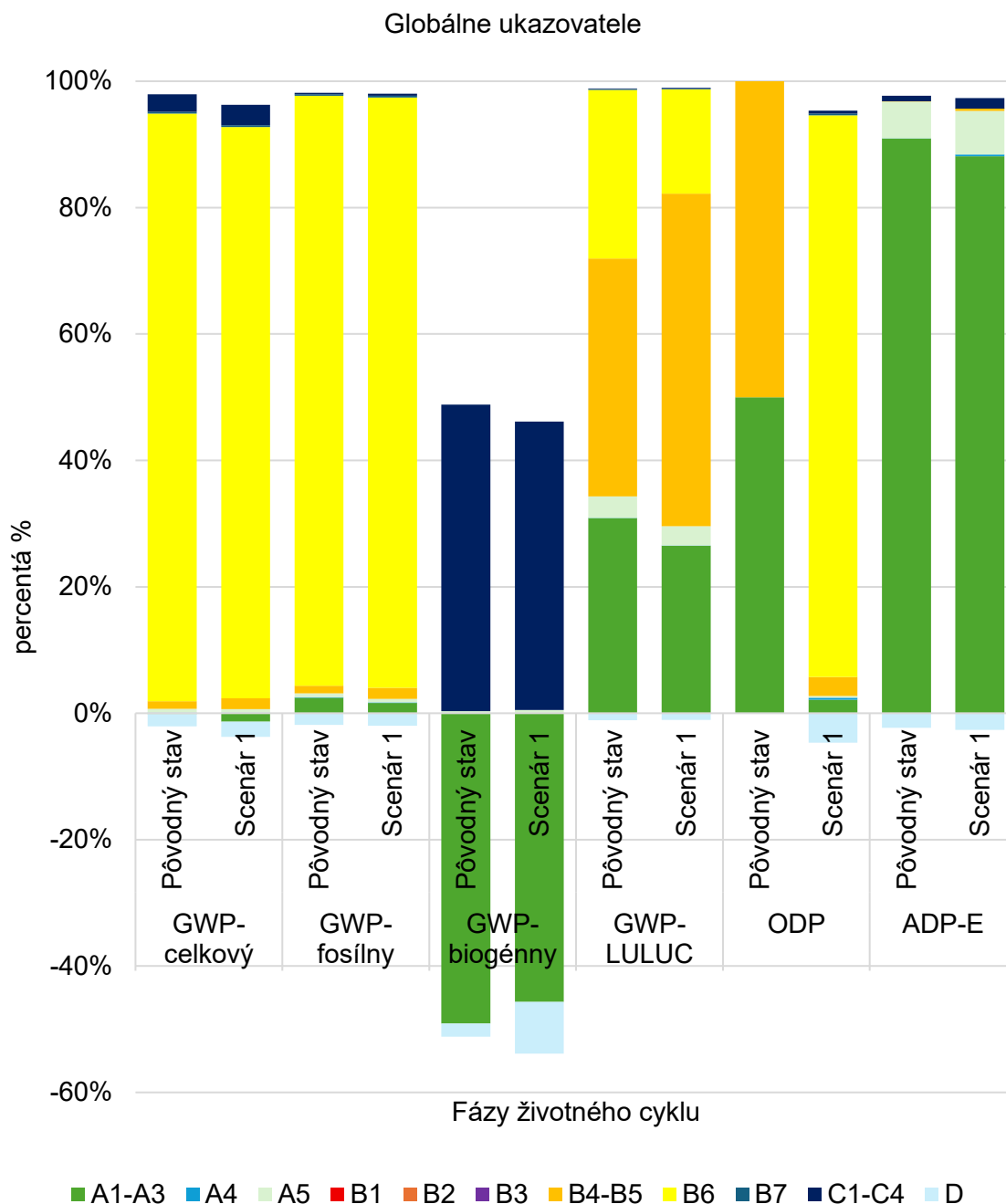
7.2.3 Vyhodnotenie rozdielov pôvodného stavu a scenára 1

Porovnanie pôvodného a navrhovaného stavu základnej školy odhaľuje environmentálny prínos cielených materiálových zámien, ktoré sa sústreďujú predovšetkým na obvodový plášť, strešnú konštrukciu, základové konštrukcie a povrchové úpravy. Prevádzková fáza spotreby energie (Modul B6) zostala v oboch variantoch identická s hodnotou GWP-celkový 11 140,68 kg CO_{2e}/m², čo potvrdzuje, že dekarbonizačný efekt navrhovaného stavu sa naplno prejavuje nie v prevádzkovej fáze, ale výhradne v materiálovej fáze a v posilnení environmentálnych kreditov na konci životnosti.

Najvýraznejší posun sa prejavuje vo výrobnej fáze stavebných materiálov (Moduly A1-A3), kde GWP-celkový klesol z -15,05 na -163,56 kg CO_{2e}/m², čo predstavuje zlepšenie o 148,51 kg CO_{2e}/m². Tento posun je výsledkom niekoľkých súbežných materiálových zmien. V oblasti obvodového plášťa bola minerálna vlna nahradená drevovláknitou izoláciou, ktorá na rozdiel od minerálnych vlákien viaže biogénny uhlík počas rastu biomasy a vykazuje záporné hodnoty GWP-biogénny. V strešnej konštrukcii bola EPS izolácia nahradená fúkanou celulózou a minerálna vlna slamou - oba materiály sú na báze biomasy a významne prehĺbujú negatívnu biogénnu zložku výrobnej fázy. Záporná hodnota GWP-biogénny vo výrobnej fáze sa prehĺbila z -309,85 na -357,47 kg CO_{2e}/m² (-47,62 kg CO_{2e}/m²), čo priamo odráža vyšší podiel materiálov na báze biomasy v navrhovanom stave. Ďalším významným faktorom je substitúcia betónu v obvodových stenách, základoch a ostatných konštrukciách - portlandský cement (CEM I, 0 % popolčeka) bol nahradený betónom s vysokopecnou troskou (CEM III/B, 75 % GGBS), ktorého výroba produkuje výrazne nižšie fosílné emisie. Zvýšenie podielu recyklovanej výstuže zo 90 % na 97 % ďalej znižuje fosílné emisie spojené s výrobou ocele. GWP-fosílny vo výrobnej fáze klesol z 293,95 na 192,72 kg CO_{2e}/m² (úspora 101,23 kg CO_{2e}/m²), pričom substitúcia cementu a výstuže predstavuje hlavný príspevok k tejto úspore. Výmena strešnej krytiny z oceľového trapézového plechu za zinkový plech s malým obsahom medi a titánu, ako aj výmena okien za energeticky úspornejšie varianty a nahradenie cementového poteru anhydritovým prispievajú k ďalšiemu zníženiu zabudovaných emisií, hoci ich individuálny príspevok je v porovnaní s izoláciami a betónom menší. K uvoľneniu biogénneho uhlíka dochádza na konci životnosti (C3-biogenic), kde navrhovaný stav vykazuje o 50,92 kg CO_{2e}/m² vyššie uvoľnenie (357,20 oproti 306,28 kg CO_{2e}/m²) — čo je prirodzeným a nevyhnutným dôsledkom väčšieho objemu materiálov v konštrukcii na báze biomasy.

Vo fáze priebežnej obnovy a údržby (Moduly B4–B5) navrhovaný stav vykazuje nárast GWP-celkový z 145,12 na 209,43 kg CO_{2e}/m² (+64,31 kg CO_{2e}/m²), čo je prirodzeným dôsledkom komplexnejšej materiálovej skladby vyžadujúcej si periodickú obnovu špecifických materiálov na báze biomasy a špeciálnych prvkov (zinková strešná krytina, drevovláknité izolácie). Z hľadiska kreditov mimo hraníc systému (Modul D) sa GWP-celkový prehĺbil z -232,98 na -298,59 kg CO_{2e}/m² (dodatočný benefit -65,61 kg CO_{2e}/m²), pričom biogénna zložka vzrástla z -13,22 na -64,14 kg CO_{2e bio}/m² — takmer päťnásobne — čo potvrdzuje výrazne vyšší recyklačný a kompostovateľný potenciál drevovláknitých izolácií, celulózy a slamy v porovnaní s konvenčnými materiálmi. V celkovom súčte životného cyklu navrhovaný stav znižuje GWP-

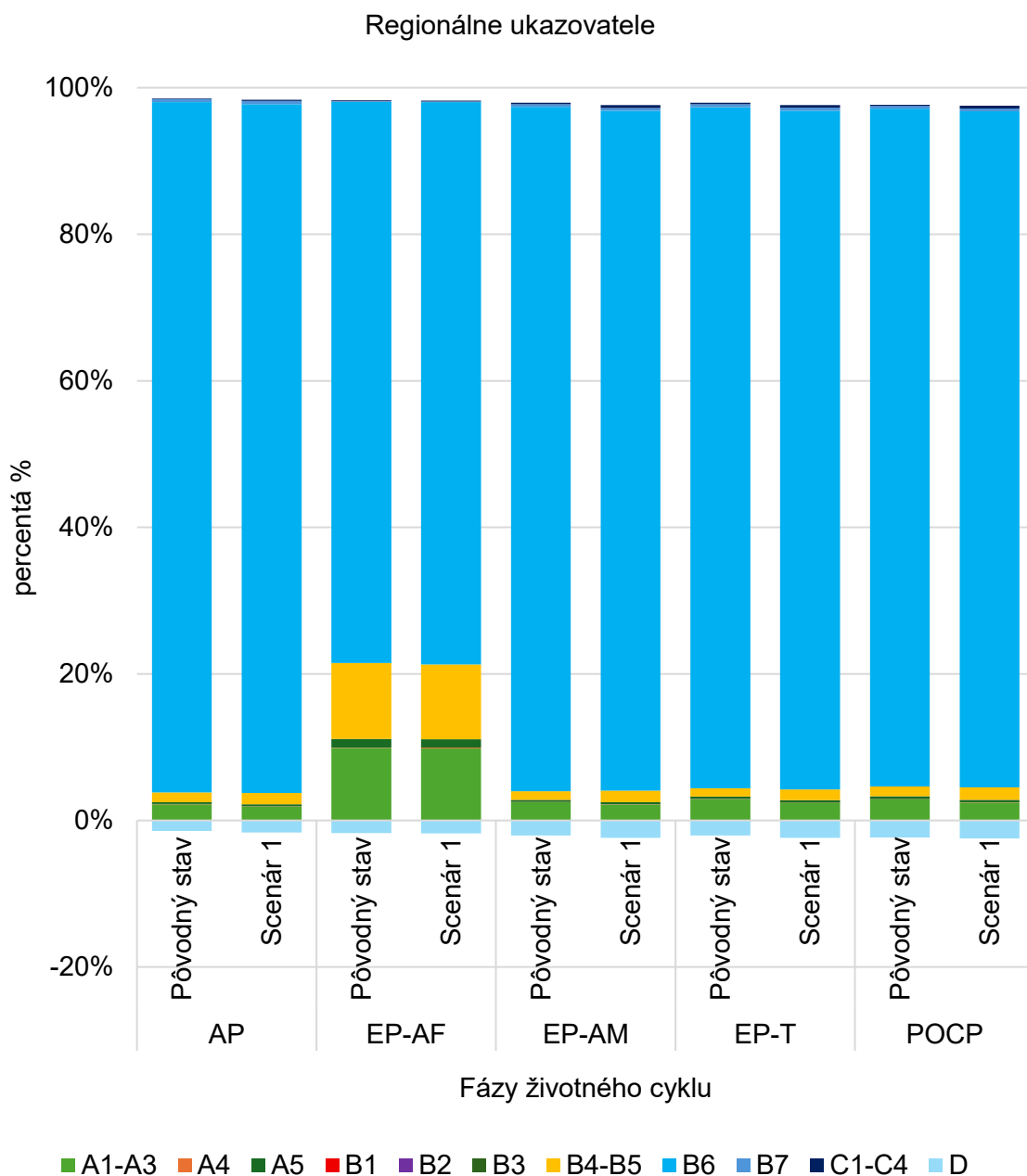
celkový o 84,72 kg CO_{2e}/m² oproti pôvodnému stavu, čo pri hrubej podlahovej ploche 1 318 m² predstavuje celkovú úsporu 111 716 kg CO_{2e} počas životného cyklu budovy. Z hľadiska ADP-E je zlepšenie obzvlášť výrazné - celková hodnota klesla z 172,82 na 9,73 kg Sbe/m² (zníženie o 163,09 kg Sbe/m²), čo odráža nahradenie oceľových a betónových prvkov s vysokým obsahom primárnych surovín materiálmi s nižšou surovinovou náročnosťou, predovšetkým vďaka použitiu GGBS cementu a vyšším podielom recyklovanej výstuže.



Obr. 7.1 Výsledky globálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy

Z hľadiska regionálnych environmentálnych indikátorov vykazuje navrhovaný stav konzistentne mierne priaznivejšie parametre oproti pôvodnému stavu, pričom dominancia prevádzkovej fázy B6 zostáva v oboch variantoch nezmenená. V kategórii AP klesla hodnota výrobných fáz A1-A3 z 1,21 na 1,04 mol H⁺ e/m², čo súvisí predovšetkým s nižšou acidifikačnou

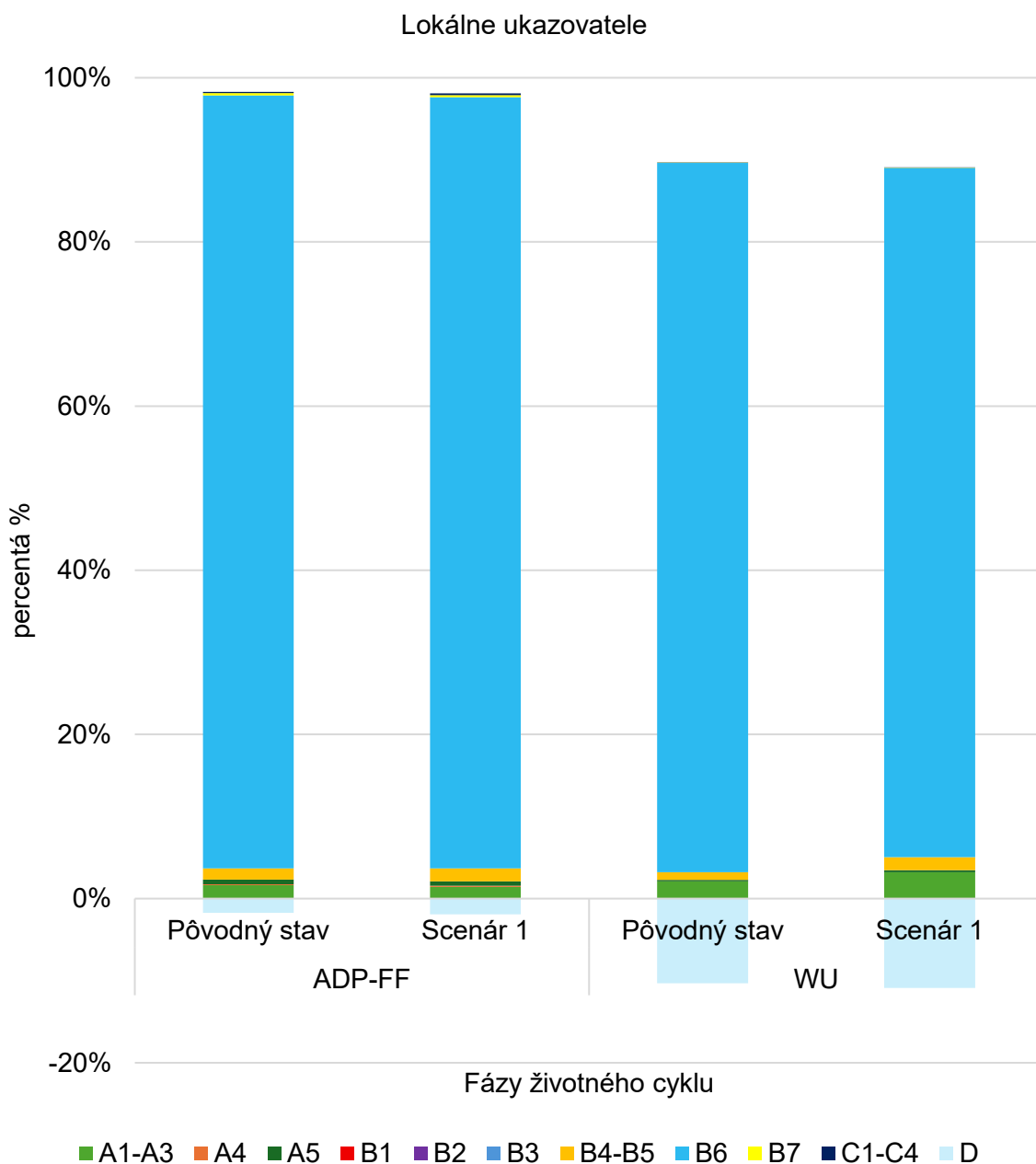
záťažou výroby GGBS cementu oproti portlandskému cementu a s nižšími emisiami spojenými s výrobou drevovláknitých izolácií oproti minerálnym vlnám. Pri analýze eutrofizácie EP-T vo výrobnej fáze klesol z 3,04 na 2,56 mol N e/m². Fáza priebežnej obnovy B4–B5 vykazuje mierne zvýšené regionálne vplyvy (EP-T z 1,17 na 1,52 mol N e/m²), čo zodpovedá väčšej materiálovej komplexnosti navrhovaného stavu. Z hľadiska kreditov v module D navrhovaný stav generuje priaznivejšie výsledky vo všetkých regionálnych kategóriách - AP z -0,78 na -0,89 mol H⁺ e/m² a EP-T z -2,16 na -2,48 mol N e/m².



Obr. 7.2 Výsledky regionálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy

Komparatívna analýza lokálnych ukazovateľov ADP-FF a WU odhaľuje zmiešaný obraz. Vo výrobnej fáze materiálov (A1-A3) navrhovaný stav dosahuje úsporu fosílnych zdrojov z 2 568,96 na 2 258,98 MJ/m² (-309,98 MJ/m²), čo priamo odráža nižšiu energetickú náročnosť výroby GGBS cementu, drevovláknitých izolácií, celulózy a slamy v porovnaní s portlandským

cementom, EPS a minerálnou vlnou. Avšak spotreba vody v tejto fáze narástla z 1 916,20 na 3 009,11 m³/m² (+1 092,91 m³/m²), čo súvisí s vyššou vodnou náročnosťou spracovania materiálov na báze biomasy a výroby zinkového plechu. Fáza priebežnej obnovy B4–B5 vykazuje podobný trend - ADP-FF narástol z 2 141,78 na 2 494,11 MJ/m² a WU z 847,47 na 1 495,73 m³/m². Z hľadiska kreditov mimo hraníc systému (Modul D) navrhovaný stav generuje výraznejší kompenzačný potenciál -ADP-FF kredit sa prehĺbil z -2 721,23 na -3 006,38 MJ/m² a WU kredit z -9 418,91 na -10 251,16 m³/m².



Obr. 7.3 Výsledky lokálnych ukazovateľov pre analyzované scenáre základnej školy

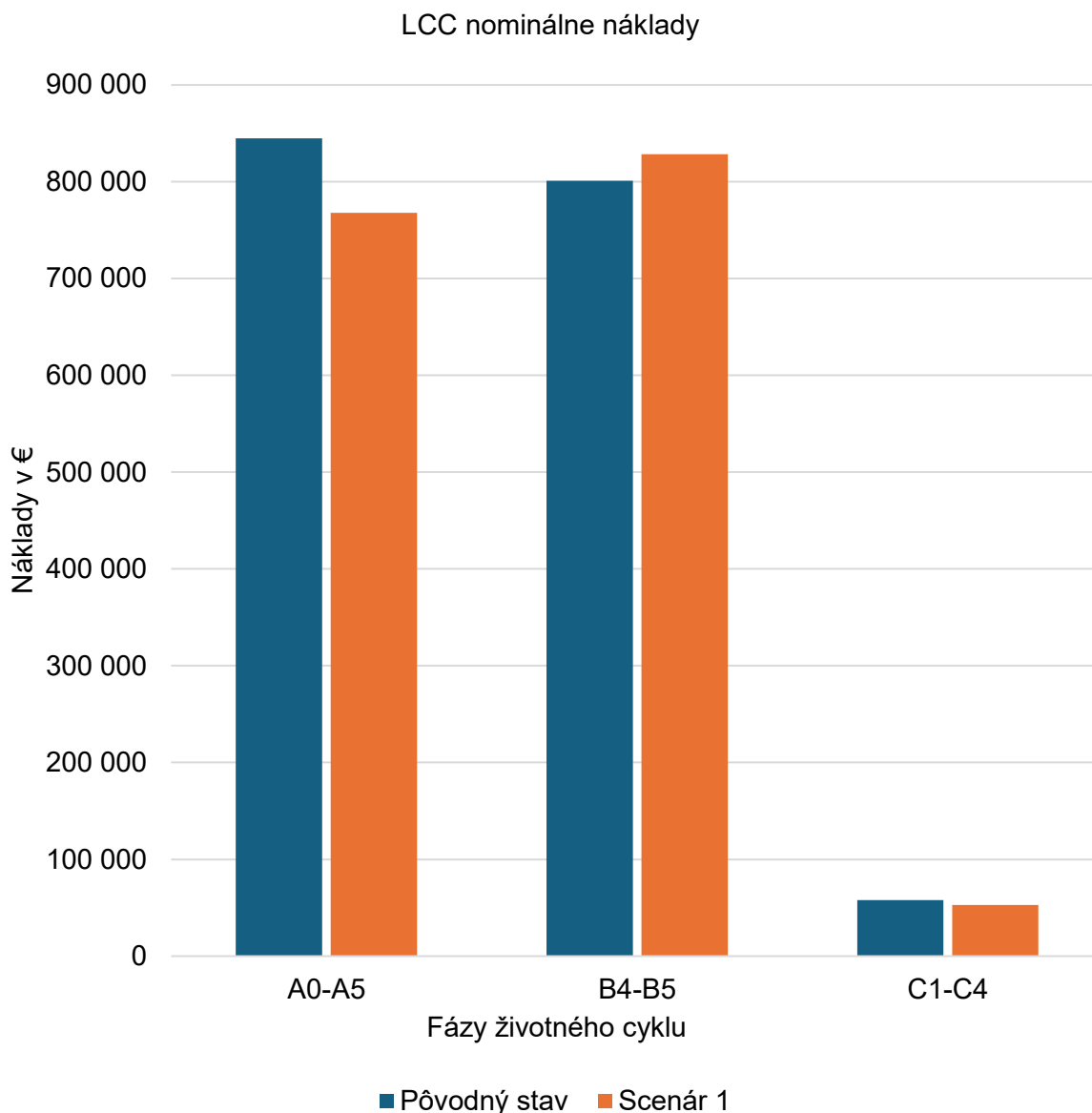
Na základe podrobnej komparatívnej LCA analýzy možno konštatovať, že navrhovaný stav (Scenár 1) predstavuje environmentálne výhodnejšiu alternatívu, ktorej dekarbonizačný efekt je primárne poháňaný štyrmi faktormi: nahradením portlandského cementu vysokopecným cementom s 75 % GGBS, náhradou konvenčných izolácií (EPS, minerálna vlna) materiálmi na

báze biomasy (drevovláknité izolácie, celulóza, slama), zvýšením podielu recyklovanej výstuže z 90 % na 97 % a výmenou strešnej krytiny za zinkový plech s vyšším recyklačným potenciálom. Hoci si navrhovaný stav vyžiadal vyššie emisie počas fáz priebežnej obnovy a väčšiu vodnú záťaž vo výrobnej fáze, tieto efekty sú kompenzované dosiahnutými úsporami zabudovaných emisií a výrazne posilnenými kreditmi v module D. Navrhovaný stav tak jednoznačne potvrdzuje, že cielená materiálová substitúcia smerom k materiálom na báze biomasy a nízkouhlíkovým alternatívam predstavuje efektívny nástroj dekarbonizácie v sektore výstavby škôl.

7.2.4 Vyhodnotenie nákladov na životný cyklus

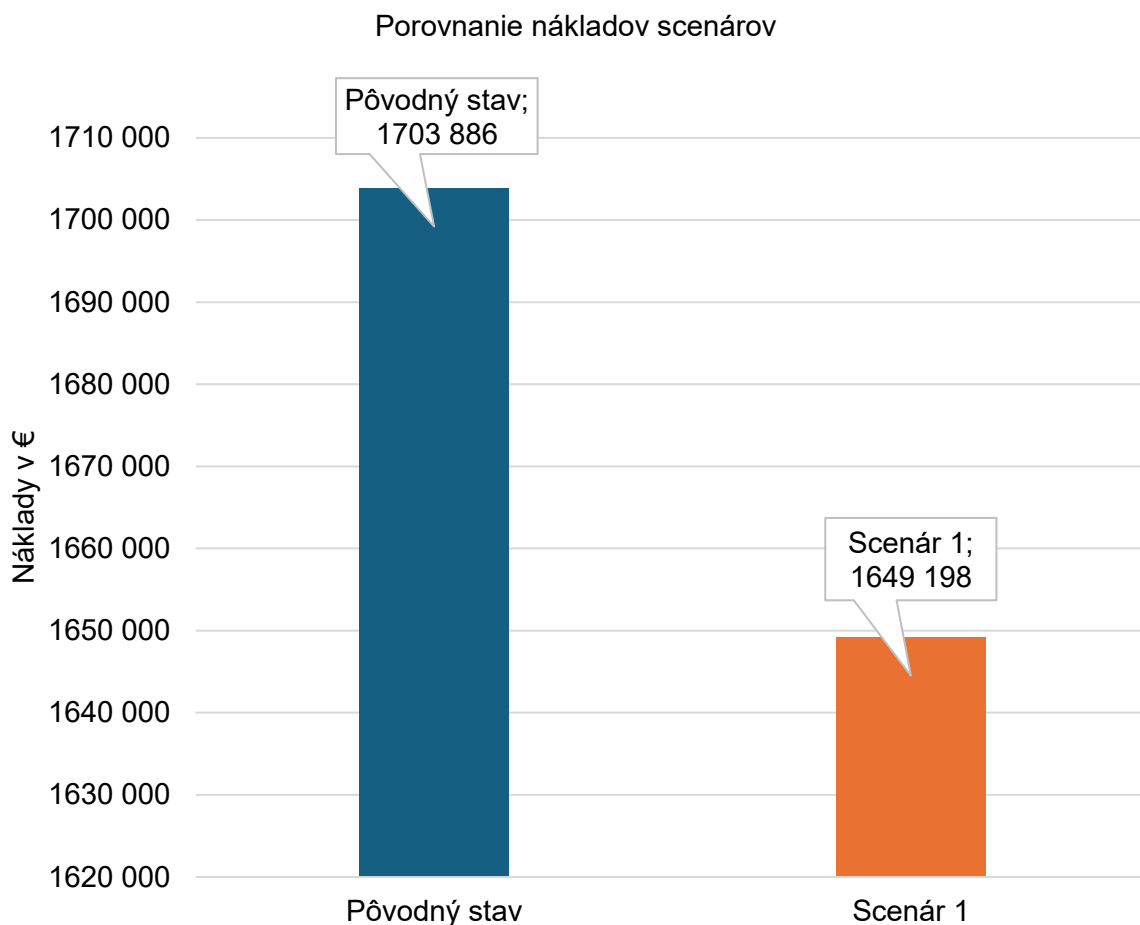
Ekonomická analýza nákladov na životný cyklus (LCC) novostavby Základnej školy bola vypracovaná v súlade s normami ISO 15686-5 a EN 16627, pričom hodnotenie zohľadňuje nominálne, nediskontované náklady vrátane započítanej inflácie. Analýza pokrýva všetky kľúčové fázy životného cyklu - od počiatočnej realizácie až po koniec životnosti (fázy A0-C4) - v rámci predpokladaného 50-ročného hodnotiaceho obdobia.

Pri analýze počiatočných investičných nákladov na výstavbu a realizáciu (moduly A0-A5) dosahuje pôvodný stav novostavby Základnej školy hodnotu 844 893 €. Implementáciou navrhovaného Scenára 1, ktorý zahŕňa materiálové substitúcie v oblasti obvodového plášťa, strešnej konštrukcie, betónových zmesí a povrchových úprav, klesajú počiatočné stavebné náklady na úroveň 768 000 €, čo predstavuje úsporu 76 894 € (–9,1 %). Toto zníženie je priamym dôsledkom substitúcie konvenčných materiálov, predovšetkým výmeny ocelevej trapézovej krytiny za zinkový plech, nahradenia betónu s portlandským cementom za betón s cementom s vysokopecnou troskou (GGBS) a optimalizácie vonkajšieho plášťa drevovláknitou izoláciou. Najvýraznejší pokles v tejto fáze zaznamenala kategória okien a dverí, kde nové zasklenie prináša úsporu 128 119 €, nasledovaná vodorovnými nosnými konštrukciami (–36 642 €) a obvodovými stenami (–19 513 €). Z pohľadu celkovej finančnej bilancie životného cyklu sa ako najvýznamnejšia fáza javí obnova a výmena stavebných komponentov po uplynutí ich životnosti (moduly B4-B5), ktorá svojím objemom nákladov takmer vyrovnáva počiatočnú investíciu. Pôvodný stav vykazuje v tejto fáze náklady 800 991 €, zatiaľ čo Scenár 1 vykazuje mierny nárast na 828 476 € (+27 485 €, +3,4 %). Tento nárast je primárne spôsobený výrazným zvýšením nákladov na obnovu interiérových podláh, kde Scenár 1 dosahuje 281 092 € oproti 125 082 € v pôvodnom stave (+156 010 €) - čo súvisí s vyššou obstarávacou cenou a frekvenciou obnovy anhydritových poterov a nových podlahových vrstiev. Naproti tomu Scenár 1 dosahuje úspory v kategórii interiérových dverí (–47 361 €) a vo vodorovných konštrukciách strešného plášťa (–36 642 €), kde materiály s dlhšou životnosťou znižujú frekvenciu cyklickej obnovy. Keďže technické systémy budovy - vrátane ventilačnej jednotky s rekuperáciou a kotla na peletky - zostali v Scenári 1 nezmenené, ich náklady na obnovu sú v oboch variantoch identické (31 346 € a 19 057 €). Rozdiely medzi pôvodným stavom a Scenárom 1 sú teda výhradne výsledkom materiálových substitúcií v stavebných konštrukciách a povrchových úpravách. V záverečnej fáze konca životnosti (C1-C4) dosahuje Scenár 1 náklady 52 723 €, čím oproti pôvodnému stavu (58 001 €) prináša úsporu 5 279 € (–9,1 %). Nižšie náklady na dekonštrukciu v Scenári 1 súvisia so zmenou materiálového zloženia - menší podiel ťažkých betónových a ocelových prvkov znižuje náklady na demoláciu, odvoz a spracovanie stavebného odpadu.



Obr. 7.4 Výsledky LCC pre analyzované scenáre základnej školy

Súhrnná LCC bilancia za celé 50-ročné hodnotiace obdobie potvrdzuje ekonomickú výhodu Scenára 1 - celkové nominálne náklady klesajú z 1 703 886 € (1 292,78 €/m²) v pôvodnom stave na 1 649 198 € (1 251,29 €/m²) v Scenári 1, čím sa dosiahne čistá úspora 54 688 € pri prepočte 41,49 €/m² na celkovú hrubú podlahovú plochu 1 318 m². Hoci mierny nárast nákladov na obnovu interiérových podláh v Scenári 1 čiastočne kompenzuje úspory dosiahnuté v počiatočnej investičnej fáze, celková finančná bilancia potvrdzuje ekonomickú opodstatnenosť navrhovaných materiálových zmien. Scenár 1 predstavuje investičnú stratégiu s nižšími počiatočnými nákladmi aj nižšími nákladmi na likvidáciu, pričom mierny nárast nákladov na obnovu zostáva v kontexte 50-ročného hodnotiaceho obdobia ekonomicky akceptovateľný.



Obr. 7.5 Výsledky celkových nákladov pre analyzované scenáre základnej školy

7.2.5 Výsledky, diskusia a komplexné zhodnotenie scenárov

Zo záverečného porovnania pôvodného stavu a Scenára 1 novostavby základnej školy vyplýva, že cieľená materiálová substitúcia smerom k nízkouhlíkovým alternatívam a alternatívam na báze biomasy prináša preukázateľný environmentálny aj ekonomický prínos, a to bez zásahu do prevádzkovej fázy budovy. Prevádzková spotreba energie (modul B6) zostáva v oboch variantoch identická (s hodnotou GWP-celkový 11 140,68 kg CO_{2e}/m²), čo potvrdzuje, že dekarbonizačný efekt Scenára 1 spočíva výhradne v redukcii zabudovaných emisií v materiálovej fáze a v posilnení environmentálnych kreditov na konci životnosti.

Environmentálny a ekonomický potenciál novostavby bol posúdený porovnaním dvoch variantov — pôvodného návrhu a Scenára 1 zahŕňajúceho materiálové substitúcie v oblasti obvodového plášťa, strešnej konštrukcie, betónových zmesí a povrchových úprav. Ťažisko analýzy spočíva v podrobnej kvantifikácii viazanej uhlíkovej stopy stavebných konštrukcií a nákladov ich životného cyklu (LCC) v rámci 50-ročného hodnotiaceho obdobia. Analýza indikátorov GWP potvrdzuje priamu súvislosť medzi materiálovou stratégiou a dekarbonizačným potenciálom budovy - pôvodný stav dosahuje vo výrobnnej fáze (A1-A3) GWP-celkový -15,05 kg CO_{2e}/m². Použitím drevovláknitej izolácie, fúkanej celulózy, slamy a GGBS betónu Scenár 1 znižuje GWP-celkový vo výrobnnej fáze na -163,56 kg CO_{2e}/m² (zlepšenie o 148,51 kg CO_{2e}/m²). Kľúčovým environmentálnym prínosom Scenára 1 je prehĺbenie biogénnej sekvestrácie uhlíka - indikátor GWP-biogénny dosahuje -357,47 kg CO_{2e}

bio/m², čo v porovnaní s pôvodným stavom (-309,85 kg CO_{2e bio}/m²) znamená, že materiály na báze biomasy integrované v Scenári 1 dokážu v budove uložiť o 47,62 kg CO_{2e bio}/m² atmosférického uhlíka viac. Vyššie uvoľnenie biogénneho uhlíka na konci životnosti (C3-biogenic: 357,20 oproti 306,28 kg CO_{2e bio}/m²) je nevyhnutným a predvídateľným dôsledkom väčšieho objemu materiálov na báze biomasy v Scenári 1. V celkovej LCA bilancii vrátane recyklačného kreditu v module D však tento efekt viac než kompenzujú úspory zabudovaných emisií - GWP-celkový klesá o 84,72 kg CO_{2e}/m², čo pri hrubej podlahovej ploche 1 318 m² zodpovedá celkovej úspore 111 716 kg CO_{2e} počas životného cyklu budovy. Materiály na báze biomasy a nízkouhlíkové materiály zároveň prispievajú k redukcii regionálnych a lokálnych vplyvov. Potenciál acidifikácie (AP) vo výrobnej fáze klesol z 1,21 na 1,04 mol H⁺ e/m² a spotreba primárnych fosílnych zdrojov (ADP-FF) vo výrobnej fáze z 2 568,96 na 2 258,98 MJ/m², čo potvrdzuje úspešné nahradenie energeticky náročných konvenčných materiálov. Významný posun nastáva tiež pri indikátore ADP-E, kde celková hodnota klesla z 172,82 na 9,73 kg Sbe/m². Potenciál cirkulárnej ekonomiky dokumentuje modul D, kde Scenár 1 dosahuje environmentálny kredit -298,59 kg CO_{2e}/m² oproti -232,98 kg CO_{2e}/m² pôvodného stavu. Biogénna zložka tohto kreditu vzrástla z -13,22 na -64,14 kg CO_{2e bio}/m², čo je takmer päťnásobný nárast a priamo odráža vyšší recyklačný a kompostovateľný potenciál drevovláknitých izolácií, celulózy a slamy oproti konvenčným minerálnym a plastovým materiálom.

Ekonomické hodnotenie nákladov životného cyklu (LCC) v súlade s normami ISO 15686-5 a EN 16627 prináša do analýzy kľúčový argument finančnej udržateľnosti navrhovaného prístupu. Pôvodný stav novostavby základnej školy vykazuje celkové nominálne náklady životného cyklu 1 703 886 € (1 292,78 €/m²). Realizácia Scenára 1 znižuje tieto náklady na 1 649 198 € (1 251,29 €/m²), čím sa dosiahne čistá úspora 54 688 € (41,49 €/m², -3,2 %) počas 50-ročného hodnotiaceho obdobia. Počiatočné investičné náklady (moduly A0-A5) klesajú z 844 893 € na 768 000 € (-76 894 €, -9,1 %), pričom najvýraznejší pokles zaznamenala kategória okien a dverí (-128 119 €), vodorovných nosných konštrukcií (-36 642 €) a obvodových stien (-19 513 €). Finančná opodstatnenosť Scenára 1 sa potvrdzuje aj v záverečnej fáze konca životnosti (C1-C4), kde náklady klesajú z 58 001 € na 52 723 € (-5 279 €, -9,1 %), čo súvisí s menším podielom ťažkých demolačných materiálov. Jediným faktorom čiastočne kompenzujúcim dosiahnuté úspory je nárast nákladov na obnovu interiérových podláh v module B4-B5 (+156 010 €), ktorý súvisí s vyššou obstarávacou cenou anhydritových poterov a nových podlahových vrstiev. Napriek tomuto nárastu zostáva celková bilancia B4-B5 v kontexte 50-ročného hodnotenia ekonomicky akceptovateľná, keďže ho kompenzujú úspory v interiérových dverách (-47 361 €) a strešných konštrukciách (-36 642 €).

V celkovom zhodnotení Scenár 1 predstavuje riešenie, ktoré dosahuje súčasne nižšie zabudované emisie, nižšie počiatočné investičné náklady aj nižšie náklady na likvidáciu, pričom zvýšená spotreba vody vo výrobnej fáze a mierny nárast nákladov na obnovu podláh predstavujú jediné kompromisy tohto prístupu. Z pohľadu dlhodobých cieľov dekarbonizácie stavebného sektora a verejnej investičnej stratégie sa implementácia materiálových zmien Scenára 1 javí ako environmentálne opodstatnená aj ekonomicky efektívna alternatíva k pôvodnému konvenčnému návrhu novostavby základnej školy.

8 Rekonštrukcia kultúrneho domu - analýza dekarbonizačného potenciálu a ekonomických aspektov

Hlavným cieľom tejto kapitoly je komplexná environmentálna a ekonomická analýza hĺbkovej rekonštrukcie konkrétneho objektu – budovy multifunkčného kultúrneho domu. Prostredníctvom tejto prípadovej štúdie kvantifikujeme nielen potenciál úspor primárnej energie a zníženia emisií skleníkových plynov (v prevádzkovej aj viazanej fáze), ale zároveň posudzujeme aj ekonomickú efektívnosť a návratnosť investovaných prostriedkov.

Budovy kultúrnych domov na Slovensku reprezentujú špecifický segment verejného stavebného fondu, ktorý bol vo veľkej miere budovaný v druhej polovici 20. storočia s minimálnymi požiadavkami na tepelno-technické vlastnosti konštrukcií. Z hľadiska energetického manažmentu predstavujú mimoriadnu výzvu kvôli svojej typológii – charakterizujú ich veľkoobjemové priestory (sály, javiská) a výrazne prerušovaná, nárazová prevádzka viazaná na kultúrne a spoločenské podujatia. To si vyžaduje flexibilný prístup k návrhu stavebných úprav a technických systémov budovy. Zameranie na budovu kultúrnej a spoločenskej infraštruktúry má okrem technicko-ekonomického rozmeru aj silný spoločenský aspekt. Modernizácia kultúrnych domov totiž priamo prispieva k skvalitneniu vnútorného prostredia pre návštevníkov, zamestnancov a účinkujúcich, pričom zároveň slúži ako príklad dobrej praxe pre samosprávy, ktoré nesú hlavnú zodpovednosť za obnovu a udržateľnosť lokálneho kultúrneho dedičstva a občianskej vybavenosti na Slovensku. V kontexte aktuálnych dekarbonizačných cieľov Európskej únie a slovenskej legislatívy (ako sú požiadavky na budovy s takmer nulovou potrebou energie – A0) navyše táto analýza poskytuje samosprávam dôležitý metodický podklad pre investičné rozhodovanie, efektívne čerpanie verejných zdrojov (napr. z Plánu obnovy a odolnosti či Európskych štrukturálnych fondov) a prechod smerom k uhlíkovej neutralite lokálnej infraštruktúry.

8.1 Inventarizačná analýza

Analýza inventarizácie životného cyklu (LCI) bola použitá na výpočet uhlíkovej stopy a ďalších environmentálnych indikátorov počas celého životného cyklu navrhovaných scenárov rekonštrukcie kultúrneho domu. Skladby stavebných konštrukcií (obvodového plášťa, strechy, stropov a otvorových konštrukcií) boli v modeloch navrhnuté a optimalizované tak, aby po rekonštrukcii bezpečne spĺňali prísne tepelno-technické požiadavky na súčiniteľ prechodu tepla (U) a tepelný odpor (R) v zmysle normy STN 73 0540-2+Z1+Z2 pre obnovu budov. Okrem stavebnej časti inventarizácia zohľadňuje aj modernizáciu technologických systémov budovy, najmä inštaláciu núteného vetrania s rekuperáciou tepla a integráciu efektívneho zdroja tepla v podobe tepelných čerpadiel, ktoré zásadným spôsobom ovplyvňujú materiálové toky a energetickú bilanciu v prevádzkovej fáze objektu.

Architektonicko-konštrukčná a materiálová charakteristika pôvodného stavu objektu

Z hľadiska materiálového zloženia a typológie konštrukcií ide o kombinovaný systém, kde spodná stavba a pôvodné podlažia (1. PP až 2. NP) využívajú tradičné konštrukcie, zatiaľ čo nová nadstavba (3. NP) je koncipovaná ako moderná ľahká drevostavba. V rámci obnovy sa systematicky odstraňujú kritické tepelné mosty a zásadne sa zvyšuje tepelno-technická ochrana celého obalového plášťa budovy s cieľom radikálneho zníženia energetickej náročnosti. Pohľady na pôvodný objekt pred rekonštrukciou je znázornený na obrázkoch 8.1 a 8.2.



Obr. 8.1 Pôvodná budova kultúrneho domu pred rekonštrukciou – bočný pohľad



Obr. 8.2 Pôvodná budova kultúrneho domu pred rekonštrukciou – predný pohľad

Základom pre hodnotenie je kompletne vypracovaný projekt obnovy tejto budovy. Analýza sa neopiera o teoretické odhady, ale posudzuje konkrétny, už navrhnutý a pripravený stav rekonštrukcie. Tento hotový návrh je detailne hodnotený z hľadiska reálne zvolených materiálov a technológií, vďaka čomu je možné presne určiť jeho environmentálny prínos,

potenciál pre znižovanie emisií a ekonomickú efektívnosť v celom životnom cykle. Grafickú podobu navrhovaných stavebných úprav ilustrujú nasledujúce obrázky, ktoré zobrazujú architektonickú vizualizáciu budovy po rekonštrukcii. Tieto vizualizácie poskytujú jasnú predstavu o finálnom estetickom a konštrukčnom riešení daného objektu kultúrneho domu.



Obr. 8.3 Pôvodná budova kultúrneho domu – vizualizácie rekonštrukcie - axonometria



Obr. 8.4 Pôvodná budova kultúrneho domu – vizualizácie rekonštrukcie – bočný pohľad



Obr. 8.5 Pôvodná budova kultúrneho domu – vizualizácie rekonštrukcie – predný pohľad



Obr. 8.6 Pôvodná budova kultúrneho domu – vizualizácie rekonštrukcie - axonometria

Vertikálne nosné a výplňové konštrukcie

Nosný systém objektu pozostáva z kombinácie pôvodných vertikálnych konštrukcií, ktoré prechádzajú sanáciou, a novovybudovaných konštrukcií zabezpečujúcich bezbariérovosť a rozšírenie úžitkových kapacít budovy.

- Obvodový plášť pôvodných podlaží: Primárnu obalovú konštrukciu 1. NP a 2. NP tvorí masívne murivo. V zmysle energetického zhodnotenia je navrhnuté komplexné exteriérové zatepl'ovanie plných fasád kontaktným zatepl'ovacím systémom s použitím minerálnych izolačných dosiek.
- Soklová časť a suterén: Obvodové steny suterénu (1. PP) a exponované nadzemné soklové zóny v rozsahu 300–500 mm nad upraveným terénom sú zateplené nenasiakavou tepelnou izoláciou z extrudovaného polystyrénu v hrúbke 140 mm.
- Vertikálne konštrukcie nadstavby (3. NP): Tretie nadzemné podlažie je vybudované kompletne nanovo ako energeticky efektívna drevostavba. Obvodové steny tohto

podlažia integrujú ekologické izolačné vrstvy, ktoré sú materiálovo optimalizované pre minimalizáciu zabudovanej uhlíkovej stopy.

- Prístavba schodiskového jadra: K existujúcej budove sa navrhuje nová prístavba schodiskového jadra s výťahom, zaisťujúca bezbariérovosť pre imobilných návštevníkov. Steny výťahovej šachty sú izolované fasádnym polystyrénom EPS hrúbky 100 mm a steny schodiska minerálnou vlnou hrúbky 150 mm.
- Vnútorne nosné steny a priečky: Vnútorne deliace konštrukcie nadväzujú na pôvodný konštrukčný systém, pričom dispozičnými zmenami na 1. PP vzniká nová technická miestnosť pre technológie. Na 2. NP sa dispozične upravuje priestor kuchyne pre výdaj stravy. V priestoroch únikových ciest a predelov požiarnych úsekov sú striktne aplikované konštrukcie s deklarovanou požiarnou odolnosťou v zmysle požiarnej bezpečnosti stavby (PBS). Nosný systém objektu pozostáva z pôvodných konštrukcií, ktoré sú v rámci rekonštrukcie komplexne zateplené exteriérovým zatepľovacím systémom.

Horizontálne konštrukcie a stropné systémy

Typológia podláh a stropov zdôrazňuje prevádzkovú náročnosť jednotlivých zón kultúrneho domu, od hlavnej sály až po administratívno-technické zázemie.

- Podlahové konštrukcie na teréne a nad suterénom (1. PP a 1. NP): Pre elimináciu tepelných strát smerom nadol sú podlahy zateplené podlahovým expandovaným polystyrénom so zvýšenou pevnosťou v tlaku. Finálne nášľapné vrstvy na 1. NP (hlavné zádverie, bufet, sociálne zariadenia, chodby a kuchyňa) využívajú vysoko odolnú keramickú, resp. betónovú dlažbu. V priestoroch hlavnej spoločenskej sály, javiska, šatní účinkujúcich a klubovní sú navrhnuté drevené parkety navrhnuté pre vysoké mechanické a akustické zaťaženie.
- Stropy: Pôvodné monolitické železobetónové stropné dosky sú staticky overené a očistené. Na 2. NP (malá sála, chodby) dominuje keramická dlažba a priestory administratívy sú opatrené parketami. Nové 3. NP je od 2. NP oddelené horizontálnou oceľovou nosnou konštrukciou v úrovni podlahy, na ktorej je vybudovaná skladba podlahy komunitných priestorov, zasadačky a dennej miestnosti. Na celom podlaží sú použité hygienicky umývateľné krytiny a v hygienických bunkách keramická dlažba. V priestoroch malej sály, chodieb a schodísk je realizovaná betónová, resp. keramická dlažba. V priestoroch administratívy a zasadacích miestností sú navrhnuté drevené parkety, ktoré prispievajú k vnútornej pohode. Technické priestory a sklady využívajú hygienicky umývateľnú podlahovú krytinu na báze PVC.
- Podlahové vrstvy 1. NP: Prízemie kombinuje betónovú dlažbu a keramickú dlažbu v komunikačných uzloch, zádverí, bufete, kuchyni a sociálnych zariadeniach. Priestor hlavného hľadiska, javiska, šatní pre účinkujúcich a klubovní je opatrený drevenými parketami navrhnutými pre akustické a mechanické zaťaženie.

Strešný plášť a konštrukcia podkrovia

Z hľadiska prechodu tepla cez horizontálne a šikmé konštrukcie prechádza strešný plášť najradikálnejšou transformáciou, nakoľko pôvodná strecha vykazovala značné defekty a nulovú izolačnú schopnosť.

- Konštrukčné riešenie novej strechy: Strešný plášť nad novovybudovaným 3. NP je navrhnutý ako moderná jednoplášťová plochá, respektíve pultová/šikmá konštrukcia s

vysokou schopnosťou fázového posunu tepla. Pôvodné nefunkčné vrstvy a násypy boli kompletne odstránené.

- Materiálové riešenie izolácie strechy: Hlavnú tepelnoizolačnú vrstvu strešného plášťa tvoria vysokoúčinné PIR dosky v hrúbke 220 mm, ktoré vykazujú špičkové hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti. Skladba strešného plášťa smerom z interiéru von pozostáva zo sadrokartónového podhľadu (SDK 12,5 mm), parotesnej zábrany, samotných PIR dosiek, poistnej hydroizolačnej fólie a finálnej povlakovej hydroizolácie z 2x natavených asfaltových pásov, ktoré zaručujú dlhodobú hydroizolačnú bezpečnosť celého objektu.

Výplne otvorov

V rámci komplexnej stavebnej obnovy dochádza k úplnej výmene pôvodných netesných drevených okenných a dverných konštrukcií za nové energeticky úsporné systémy:

- Exteriérové výplne otvorov: Všetky nové okná, vstupné dvere a zasklené steny zádveria sú navrhnuté s izolačným trojsklom, pričom splňajú sprísnené normové požiadavky na súčiniteľ prechodu tepla pre verejné budovy.
- Interiérové výplne otvorov: Vnútorne dverné konštrukcie rešpektujú novú dispozičnú typológiu. V miestnostiach suterénu (technická miestnosť), únikových cestách a prechodoch medzi požiarnymi úsekmi (najmä v nadväznosti na nové schodiskové jadro a nadstavbu) sú osadené certifikované požiarne dvere so špecifikovanou požiarnou odolnosťou.

Architektonicko-konštrukčná a materiálová charakteristika nového stavu objektu (Scenár 1)

V rámci hĺbkovej obnovy bol z hľadiska systematickej dekarbonizácie, minimalizácie viazaných emisií skleníkových plynov a znižovania prevádzkovej uhlíkovej stopy navrhnutý Scenár 1. Tento scenár transformuje pôvodný murovaný objekt prostredníctvom cieľenej integrácie prírodných, uhlíkovo neutrálnych materiálov s vysokou schopnosťou sekvestrácie CO₂ a moderných environmentálnych technológií. V celom koncepte Scenáru 1 sa systematicky odstraňujú kritické tepelné mosty, zvyšuje sa tepelno-technická ochrana obalu budovy a redukujú sa environmentálne dopady stavebných procesov už vo fázach A1–A3 (výroba a zabudovanie materiálov).

Zateplenie obvodového plášťa a základov (Systém ETICS a fúkaná izolácia)

Všetky nové zateplňovacie vrstvy sú navrhnuté s cieľom radikálne zlepšiť tepelno-technické vlastnosti budovy multifunkčného kultúrneho domu pri striktné ekologickom prístupe k voľbe materiálovej bázy.

- Zateplenie obvodovej steny: V novom návrhu sa namiesto tradičných priemyselných izolácií na báze ropy či minerálnych tavenín uplatňuje udržateľná tepelná izolácia na báze celulózy (v hrúbke 160 mm). Celulóza, vyrobená z recyklovaného papiera, funguje ako pasívny rezervoár uhlíka. Aplikovaná je v kombinácii s predsadeným dreveným roštovým systémom, vysoko difúznou poistnou fóliou a finálnym fasádnym systémom.
- Vnútorne priečky a deliace konštrukcie: V rámci dispozičných zmien interiéru sú nové vnútorné priečky materiálovo preformované. Tradičná výplň z minerálnej vlny je kompletne nahradená ekologickou drevovláknitou izolačnou doskou. Táto bio-izolácia

výrazne zvyšuje akustický útlm medzi spoločenskými zónami a vďaka vysokej mernej tepelnej kapacite prispieva k tepelnej stabilite interiéru v letnom období.

- Zateplenie základov a sokla: Z dôvodu trvalého pôsobenia vlhkosti a mechanického namáhania v úrovni spodnej stavby je navrhnutá tepelná izolácia z extrudovaného polystyrénu (XPS) v hrúbke 100 mm.

Horizontálne konštrukcie a externé betónové práce

Konštrukčné zásahy do horizontálnych vrstiev podláh, prístavieb a exteriérového okolia integrujú moderné postupy obehového hospodárstva (cirkulárnej ekonomiky).

- Využitie nízko emisného betónu a recyklovaného kameniva: Pri realizácii nových exteriérových konštrukcií, akými sú bezbariérová prístupová rampa pre imobilných návštevníkov, nové vstupné schodisko a externé základové pätky, je predpísané použitie ekologického betónu s nízkym slinkovým faktorom. Využíva sa cement typu CEM III (vysokopečný cement), ktorý v porovnaní s čistým portlandským cementom znižuje emisie CO₂ pri výrobe až o 40 %. Navyše, do týchto exteriérových betónových zmesí a podkladových vrstiev spevnených plôch je systematicky integrované recyklované stavebné kamenivo pochádzajúce z lokálnych zdrojov, čím sa minimalizuje čerpanie primárnych prírodných surovín a znižujú sa prepravné vzdialenosti (modul A4).
- Vnútorne podlahové vrstvy: Podlahy na teréne (1. NP) sú tepelne izolované grafitovým podlahovým polystyrénom so zvýšeným zaťažením. Reprezentatívne priestory hlavnej spoločenskej sály, javiska a klubovní sú vybavené nášľapnou vrstvou z masívnych drevených parkiet. V komunikačných jadrách a hygienickom zázemí je osadená vysoko odolná keramická dlažba.

Nová strešná konštrukcia a zateplenie stropov

V novom návrhu sa počíta s úplným odstránením pôvodných degradovaných strešných vrstiev a nestabilných škvárových násypov až po nosnú železobetónovú stropnú konštrukciu.

- Zateplenie stropov a podkrovia celulózou: Horizontálna konštrukcia stropu pod nevykurovanou povalou a šikmé konštrukcie nového podkrovia sú izolované udržateľnou fúkanou celulózovou izoláciou v celkovej projektovanej hrúbke 340 mm. Izolácia je fúkaná do pripravených drevených krabicových nosníkov. Zo strany interiéru skladbu uzatvára vysoko účinná parozábrana, zatiaľ čo z exteriérovej strany je aplikovaná difúzne otvorená fólia. Pre zachovanie funkčnosti priestoru je na povale realizovaný pochôdzny záklop z OSB dosiek s ekologickým spojivom bez formaldehydu.
- Nosná konštrukcia a strešný plášť: Na úrovni podkrovia sa realizuje nový obvodový ŽB stužujúci veniec. Nosná konštrukcia strechy je tvorená novým tesárskym krovom z certifikovaného ihličnatého reziva s plným debnením z dosiek hrúbky 25 mm.
- Krytina a klampiarske prvky: Finálnu ochranu pred poveternostnými vplyvmi tvorí falcovaná plechová krytina s hrúbkou 0,5 mm uložená na poistnej hydroizolácii.

Tab. 8.1 Výmena materiálov oproti pôvodnému modelu

	Skladba vrstiev (zvnútra von)	R [m ² ·K/W]	U [W/m ² ·K]
Pôvodná skladba: Stena	Omietka + Tehlové murivo (450 mm) + Minerálna vlna (200 mm) + Silikónová omietka	5,55	0,17
Scenár 1: Celulózová izolácia	Omietka + Tehlové murivo (450 mm) + Fúkaná celulóza (240 mm) v rošte + Omietka	6,95	0,14
Pôvodná skladba: Strop	ŽB stropná doska (150 mm) + Minerálna vlna (140 mm) + Pochôdzny násyp	-	-
Scenár 1: Strop	ŽB stropná doska (150 mm) + Fúkaná celulóza (260 mm) v rošte + OSB záklop	-	-
Pôvodná skladba: Strecha	SDK (12,5 mm) + Parozábrana + PIR izolácia (220 mm) + 2x Asfaltový pás	10,14	0,1
Scenár 1: Celulózová izolácia	SDK (12,5 mm) + Parozábrana + Fúkaná celulóza (280 mm) + 2x Asfaltový pás	7,36	0,13
Pôvodná skladba: Vnútoraná stena	SDK opláštenie (12,5 mm) + Minerálna akustická vlna (75 mm) + SDK opláštenie (12,5 mm)	-	-
Scenár 1: Drevovláknitá izolácia	SDK opláštenie (12,5 mm) + Drevovláknitá doska (75 mm, 180 kg/m ³) + SDK opláštenie (12,5 mm)	-	-

8.2 Analýza vplyvov na životné prostredie

V rámci fázy hodnotenia vplyvov na životné prostredie (LCIA) boli vyhodnotené všetky inventarizačné dáta zhromaždené pre dva navrhované modely komplexnej obnovy budovy základnej školy. Zvolený prístup LCA posudzoval viaceré kategórie environmentálnych vplyvov v prísnom súlade s európskou normou EN 15804+A2. Prehľad hodnotených kategórií vplyvov je uvedený v tabuľke 8.2. Tieto kategórie boli na účely podrobnejšej interpretácie rozdelené na globálne, regionálne a lokálne.

Tab. 8.2 Parametre popisujúce základné vplyvy na životné prostredie

Kategória vplyvu	Skratka	Jednotka
Potenciál globálneho otepľovania – celkový	GWP-celkový	kg CO _{2e}
Potenciál globálneho otepľovania – fosílny	GWP-fosílny	kg CO _{2e}
Potenciál globálneho otepľovania – biogénny	GWP-biogénny	kg CO _{2 bio}
Potenciál globálneho otepľovania – využitie krajiny a zmena využitia krajiny	GWP-LULUC	kg CO _{2e}
Potenciál úbytku stratosférickej ozónovej vrstvy	ODP	kg CFC 11 _e
Potenciál acidifikácie (okysľovania) pôdy a vody	AP	mol H ⁺ _e
Potenciál eutrofizácie pre sladkovodné prostredie	EP-AF	kg P _e
Potenciál eutrofizácie pre morské prostredie	EP-AM	kg N _e

Potenciál terestrickej (suchozemskej) eutrofizácie	EP-T	mol N _e
Potenciál tvorby troposférického ozónu	POCP	kg NMVOC _e
Potenciál úbytku abiotických surovín pre nefosílnu zdroj	ADP-E	kg Sb _e
Potenciál úbytku abiotických surovín pre fosílnu zdroj	ADP-FF	MJ
Potenciál nedostatku vody	WD	m ³

8.2.1 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Pôvodný stav)

Kvantitatívna analýza životného cyklu (LCA) odhaľuje distribúciu environmentálnej záťaže v jednotlivých fázach. Hodnotenú sú primárne kategórie vplyvu: GWP-celkový, GWP-fosílny, GWP-biogénny a GWP-LULUC.

Táto kapitola sa zaoberá vyhodnotením environmentálnych vplyvov pôvodného stavebno-technického stavu kultúrneho domu prostredníctvom metodiky LCA. Výsledky sú vyjadrené v kategóriách potenciálu globálneho otepľovania (GWP) v ekvivalentoch CO₂ a sú rozčlenené podľa jednotlivých modulov životného cyklu budovy v súlade s normou EN 15978.

Analýza životného cyklu (LCA) pôvodného návrhu obnovy objektu multifunkčného kultúrneho domu vykazuje za stanovené 50-ročné hodnotiace obdobie celkovú produkciu skleníkových plynov na úrovni 410,84 kg CO_{2e}/m² (GWP-celkový). Tento výsledok reflektuje konvenčný prístup k stavebnej obnove verejných budov, kde sa na dosiahnutie požadovaných energetických úspor nasadzujú tradičné priemyselné materiály s vysokou mierou viazaného fosílného uhlíka. Podrobné výsledky jednotlivých kategórií a fáz GWP pre pôvodný stav objektu sú uvedené v tabuľke 8.3 a obrázku 8.7.

Tab. 8.3 Výsledky LCA hodnotených fáz životného cyklu pre kultúrny dom v kg CO_{2e}/m²

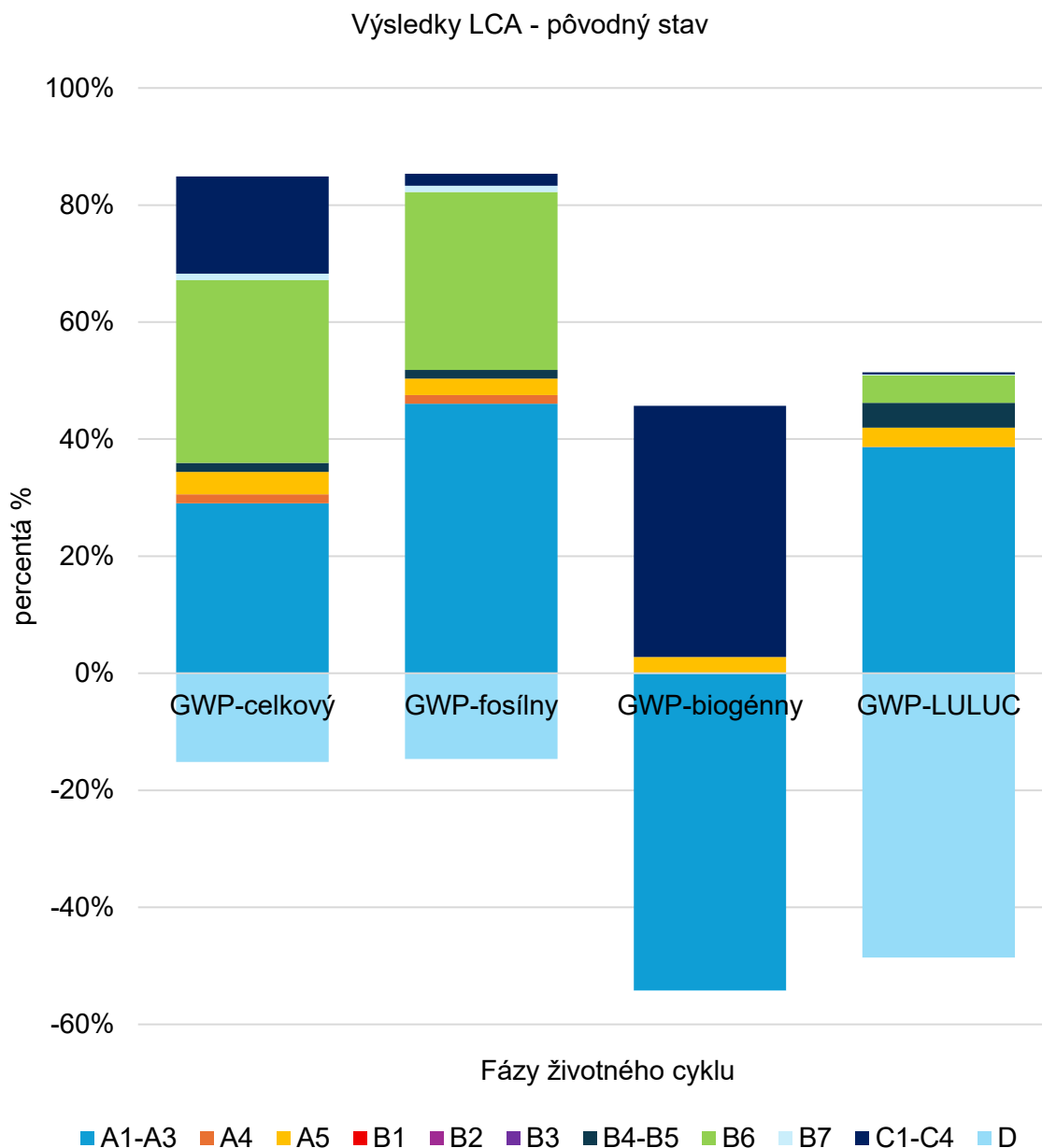
Ukazovatele	A1-A3	A4	A5	B1-B3	B4-B5	B6	B7	C1-C4	D	Celkovo
GWP-celkový	140.64	7.34	18.56	0.00	7.53	151.11	5.34	80.32	-73.29	410.84
GWP-fosílny	229.02	7.34	13.97	0.00	7.51	151.09	5.34	10.21	-72.91	424.48
GWP-biogénny	-88.57	0.00	4.57	0.00	0.00	0.00	0.00	70.10	-0.14	-13.90
GWP-LULUC	0.19	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	-0.24	0.26

Fáza A1-A3 predstavuje počiatočné environmentálne zaťaženie spojené so samotnou realizáciou projektu obnovy. Súčet emisií vo fázach výroby materiálov (A1-A3), ich prepravy na stavenisko (A4) a procesov inštalácie (A5) generuje výraznú časť uhlíkovej stopy. Fáza výroby (A1-A3) je v tomto modeli kritická, nakoľko zateplenie obvodových stien minerálnou vlnou hrúbky 200 mm a najmä realizácia strešného plášt'a z chemicky syntetizovaných PIR dosiek (220 mm) vyžadujú energeticky intenzívne priemyselné procesy. Tavenie hornín pri

vysokých teplotách a rafinácia ropných derivátov uvoľňujú do atmosféry značný objem fosílného CO_{2e}. Následná logistika a inštalácia (A4-A5), zahŕňajúca prepravu ťažkých izolačných materiálov, dovoz betónových zmesí pre schodiskovú prístavbu a prevádzku mechanizácie priamo na stavenisku, pridávajú do celkovej environmentálnej bilancie stabilný a fixný emisný príspevok.

Z hľadiska časového horizontu je fáza užívania najväčším prispievateľom k celkovému potenciálu globálneho otepľovania, pričom emisie sú rozdelené do dvoch hlavných prevádzkových oblastí. Prevádzková spotreba energie (B6) predstavuje dominantnú zložku s emisiami 151 kg CO_{2e}/m². Vďaka tomu, že pôvodný projekt rekonštrukcie úspešne znižuje spotrebu energie na vykurovanie a využíva účinné tepelné čerpadlá, je táto hodnota stabilizovaná a optimalizovaná. Druhú oblasť tvorí prevádzková spotreba vody (B7) a pridružená údržba či obnova materiálov (B4-B5). Tieto moduly vyjadrujú emisie spojené s dodávkou pitnej vody, odvádzaním odpadových vôd a predpokladanou cyklickou výmenou menších stavebných prvkov (ako sú nátery, tmely či tesnenia), ktoré vykazujú výrazne kratšiu životnosť, než je definovaná 50-ročná prevádzka kultúrneho domu.

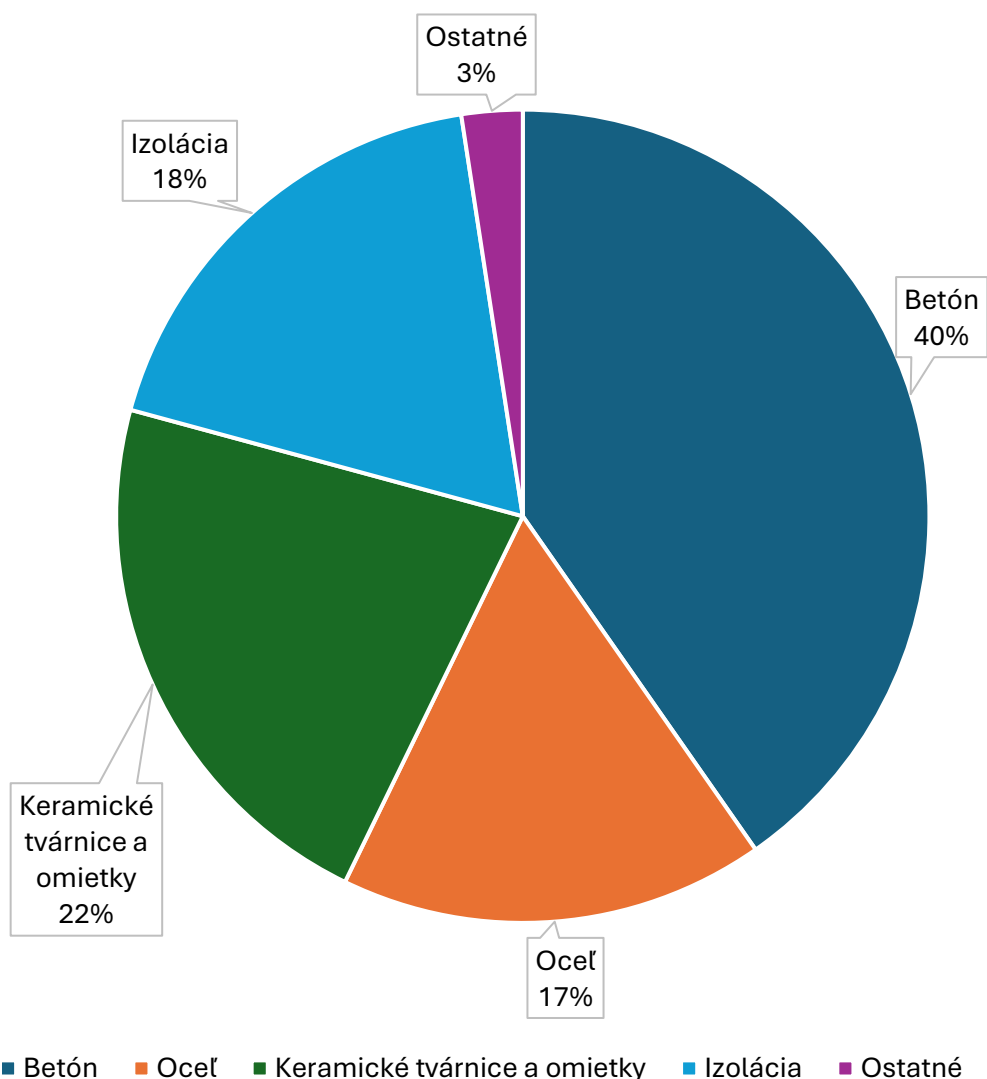
Fáza C1-C4 dekonštrukcie a demolácie, transport stavebného odpadu, spracovanie odpadu pre recykláciu a jeho konečné uloženie, prispieva do celkového hodnotenia environmentálnou záťažou vo výške 80.32 kg CO_{2e}/m². Vyššie emisie v tejto záverečnej fáze sú spôsobené najmä modulom C4 (skládkovanie). Použitá minerálna kamenná vlna a najmä kompozitné materiály na báze chemických PIR dosiek v kombinácii s hydroizolačnými asfaltovými pásmi sú po demontáži technologicky ťažko recyklovateľné a separovateľné. To vedie k ich nevyhnutnému ukladaniu na skládky inertného stavebného odpadu bez možnosti opätovného zhodnotenia v rámci obehového hospodárstva. Fáza D predstavuje kľúčový indikátor obehového hospodárstva, ktorý kvantifikuje čisté environmentálne prínosy (vyjadrené ako záporné hodnoty emisií, t. j. úspora CO_{2e} alebo dodatočnú záťaž vyplývajúcu z recyklácie, opätovného použitia a energetického zhodnotenia materiálov po demolácii objektu. V pôvodnom projekte rekonštrukcie kultúrneho domu je celkový potenciál fázy D v porovnaní s inými fázami životného cyklu veľmi obmedzený, čo priamo vyplýva z charakteru navrhnutých konvenčných stavebných produktov. Prvky zo systémov výplní otvorov (hliníkové profily okien) a elektroinštalčné rozvody prispievajú k úspore emisií vďaka vysokej ekonomickej aj ekologickej hodnote druhotného materiálu. Pôvodný projekt rekonštrukcie uvažuje s bežným betónom a maltami. Pri dekonštrukcii vzniká ťažký inertný odpad. Ak sa tento odpad podrobí recyklácii (drveniu na recyklované kamenivo), prínos vo fáze D je minimálny, nakoľko nahrádza nízko emisnú primárnu surovinu (prírodný štrk/kamenivo z lomu), čo nevedie k zásadnému zníženiu globálneho otepľovania (GWP). Environmentálny kredit za úsporu CO_{2e} vo fáze D je generovaný minoritnými prvkami (napr. kovové konštrukcie).



Obr. 8.7 Výsledky LCA pre ukazovatele životného cyklu

Analýza LCA odhaľuje, že celkový objem zabudovaných emisií skleníkových plynov je v pôvodnom stave distribuovaný nerovnomerne medzi hmotnostne dominantné a emisne intenzívne prvky. Z hľadiska celkovej hmotnosti v štruktúre jednoznačne vedú minerálne látky - predovšetkým konvenčný betón (zmesi s cementom triedy CEM I / CEM II použité na prístavbu schodiskového jadra, výťahovej šachty a externých rámp), pôvodné tehlové murivo a cementové potery v podlahách. Avšak z pohľadu príspevku ku GWP-celkový sú najvyššou zložkou tepelné izolácie, kde chemicky syntetizované PIR dosky v hrúbke 220 mm na strešnom plášti nadstavby a dosky z minerálnej kamennej vlna na zateplenie obvodových stien vykazujú vysokú uhlíkovú intenzitu, ktorá vychádza z energeticky náročného tavenia surovín vo fáze výroby (A1-A3). Významný emisný podiel dopĺňajú aj konštrukčná oceľ, výstuž, hliníkový rošt a strešné asfaltové hydroizolačné pásy. Celý tento materiálový model tak potvrdzuje limity konvenčného prístupu, ktorý dosahuje legislatívne ciele energetickej triedy

A0 za cenu vysokej počiatkovej ekologickej záťaže bez prítomnosti biogénneho uhlíka, ktorý by tieto emisie v konštrukcii dokázal prirodzene kompenzovať. Podiel emisií materiálov v percentách je zobrazený na obrázku 8.8.



Obr. 8.8 Analýza materiálov s najväčším environmentálnym vplyvom v percentách

8.2.2 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov (Scenár 1)

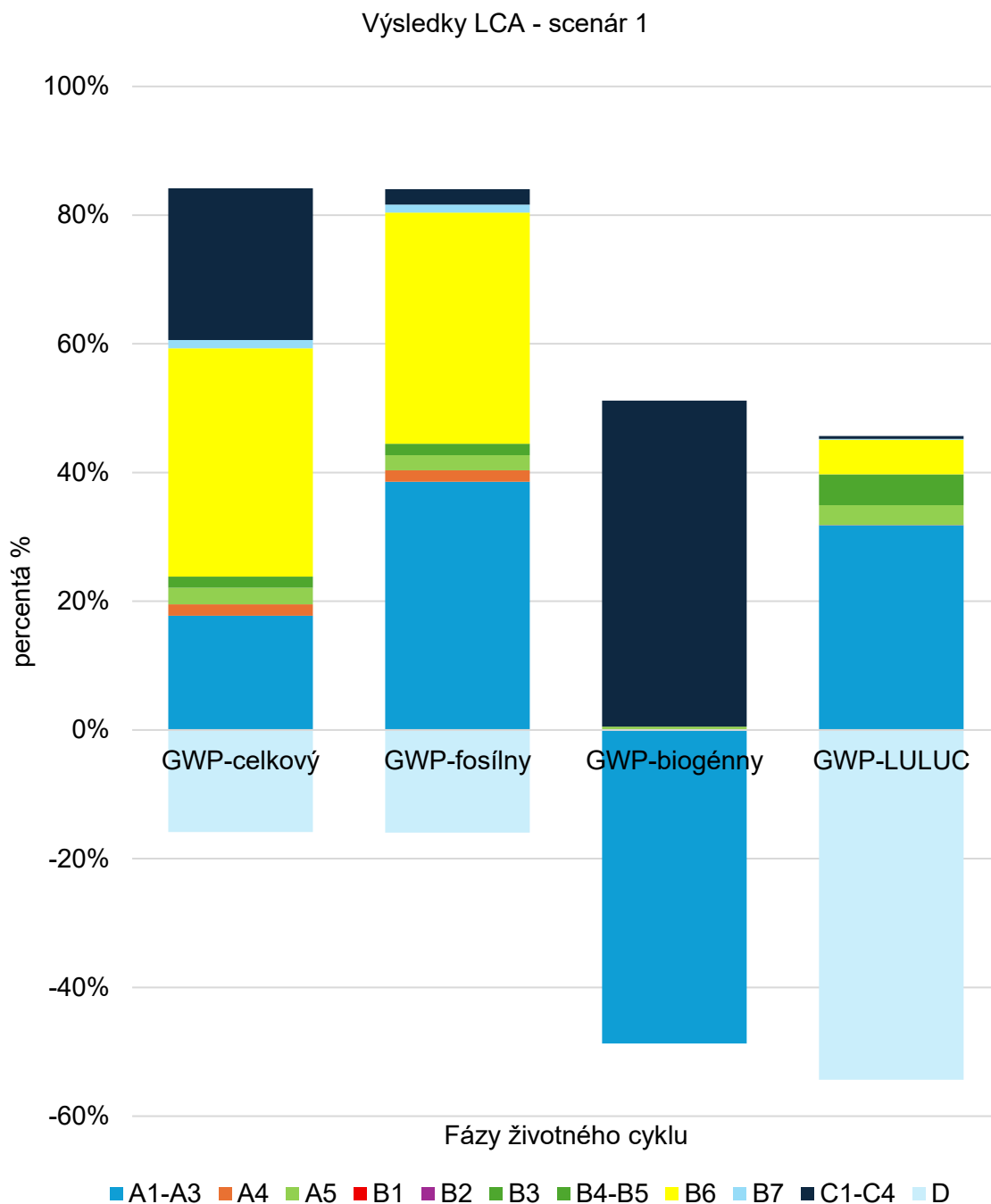
Scenár 1 dosahuje celkovú bilanciu potenciálu globálneho otepľovania (GWP-celkový) na úrovni 358,51 kg CO_{2e}/m². Po započítaní benefitov mimo hraníc systému (Modul D, ktorý prináša úsporu -67,50 kg CO_{2e}/m²), je čistá uhlíková stopa projektu znížená na 290,53 kg CO_{2e}/m². GWP-fosílny je dominantnou zložkou celkovej uhlíkovej stopy (predstavuje až cca 98,7% emisií vo fázach A-C). Celkové fosílné emisie dosahujú 353,40 kg CO_{2e}/m². Hlavným prispievateľom sú procesy spojené so spotrebou energie vo fáze prevádzky (modul B6) a emisie viazané vo výrobe stavebných materiálov (fáza A1-A3). GWP-biogénny ukazuje dynamiku ukladania a uvoľňovania uhlíka viazaného v prírodných materiáloch. Vo fáze výroby (A1-A3) vidíme výrazne uloženie uhlíka (sekvestráciu) na úrovni -86,90 kg CO_{2e}/m², čo naznačuje integráciu dreva a iných biogénnych materiálov do konštrukcie. Pri likvidácii (C1-C4) sa však tento uhlík uvoľňuje späť (90,30 kg CO_{2e}/m²), čo vedie k takmer neutrálnej bilancii v rámci celého cyklu (čistý vplyv s modulom D je len 4,24 kg CO_{2e}/m²).

GWP-LULUC má na celkový výsledok zanedbateľný vplyv s celkovou bilanciou okolo nuly (životný cyklus A-C generuje len 0,20 kg CO_{2e}/m² a modul D dokonca vykazuje mierny prínos -0,24 kg CO_{2e}/m², čo znamená, že zmeny v obhospodarovaní pôdy spojené s dodávateľským reťazcom nie sú pre tento projekt kritickým faktorom. Podrobné výsledky jednotlivých kategórií a fáz GWP pre scenár 1 objektu kultúrneho domu sú uvedené v tabuľke 8.3 a obrázku 8.9.

Tabuľka 8.3 Výsledky LCA hodnotených fáz životného cyklu pre kultúrny dom kg CO_{2e}/m²

Ukazovatele	A1-A3	A4	A5	B1-B3	B4-B5	B6	B7	C1-C4	D	Celkovo
GWP-celkový	75.65	7.46	10.97	0.00	7.53	151.11	5.34	100.43	-67.50	358.51
GWP-fosílny	162.38	7.46	9.99	0.00	7.51	151.09	5.34	10.12	-67.12	353.90
GWP-biogénny	-86.87	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00	90.31	-0.14	4.41
GWP-LULUC	0.14	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	-0.24	0.20

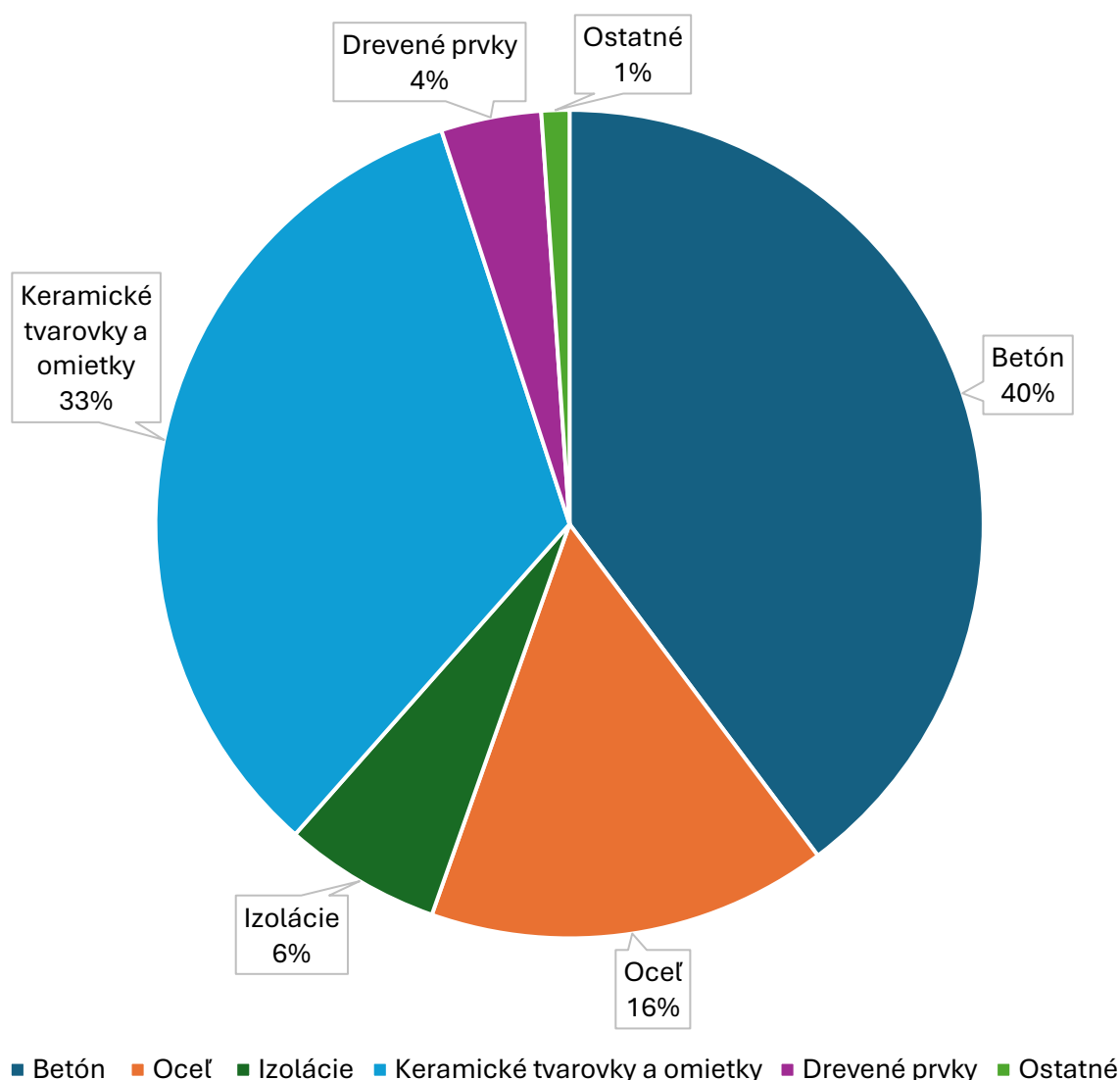
Fáza produktu (A1-A3) vykazuje hodnotu 75,70 kg CO_{2e}/m². Ide o priaznivý výsledok, ktorý je výrazne znížený spomínaným biogénnym viazaním uhlíka (fosílna emisie materiálov sú síce 162,00 kg CO_{2e}/m², no biogénny kredit ich znižuje o viac ako polovicu). Doprava na stavenisko (A4: 7,46 kg CO_{2e}/m²) a samotná realizácia stavby (A5: 11,00 kg CO_{2e}/m²) predstavujú minoritné zaťaženie. Fázy užívania B1-B3 vykazujú nulové hodnoty. Emisie spojené s obnovou a výmenou prvkov (B4-B5) sú nízke (7,53 kg CO_{2e}/m²). Dôležitá je však fáza B6, ktorá generuje až 151,1 kg CO_{2e}/m². Prevádzková spotreba energie tak tvorí najväčšiu environmentálnu záťaž budovy (cca 42% celého životného cyklu A-C), čo otvára priestor pre dekarbonizačné opatrenia (napr. inštalácia OZE, efektívnejší energetický manažment). Prevádzková spotreba vody (B7) prispieva sumou 5,34 kg CO_{2e}/m². Fáza konca životnosti (C1-C4) vykazuje vysokú nominálnu hodnotu 100,43 kg CO_{2e}/m². Je to spôsobené najmä uvoľnením skôr uskladneného biogénneho uhlíka (90,31 kg CO_{2e}/m²) pri demolácii a spracovaní odpadu, zatiaľ čo fosílna emisie v tejto fáze sú relatívne nízke (10,12 kg CO_{2e}/m²). Modul D vykazuje vynikajúci dekarbonizačný potenciál na úrovni -67,50 kg CO_{2e}/m². To dokazuje, že materiály zvolené v Scenári 1 sú po skončení životnosti kultúrneho domu vysoko recyklovateľné a energeticky využiteľné, čím nahrádzajú primárne suroviny/fosílna zdroje a prinášajú významný globálny environmentálny benefit.



Obr. 8.9 Výsledky LCA pre ukazovatele životného cyklu

V rámci rozšíreného a detailného hodnotenia výrobnéj fázy (A1-A3) dosiahla celková bilancia zabudovaného uhlíka analyzovaných konštrukčných prvkov a technológií hodnotu približne 175 012 kg CO_{2e}. V tomto komplexnom materiálovom modeli preberajú dominantnú environmentálnu záťaž masívne konštrukčné materiály. Najväčším pôvodcom emisií skleníkových plynov je betónová zmes a betónové tvárnice, ktoré generujú až 37,1% z celkového objemu, pričom najkritickejšou položkou je betón triedy C20/25 s vplyvom vyše 44 700 kg CO_{2e}. Druhú najvýznamnejšiu skupinu predstavujú oceľové konštrukcie vrátane výstuže, nosníkov a profilov s podielom 15,4%, nasledované keramickým murivom, ktoré sa na celku podieľa 13,7%. Významnú environmentálnu stopu v rámci obvodového plášťa

zanechávajú pórobetónové tvárnice (9,5% čo je 16 590 kg CO_{2e}), hliníkový fasádny obklad (7,9 čo je 13 800 kg CO_{2e}) a vlákno cementové dosky (6,6% čo je 11 603 kg CO_{2e}). Celkový segment tepelných izolácií (zahŕňajúci minerálnu vlnu, PIR, XPS, EPS, drevovláknitú a fúkanú celulózu) tvorí vďaka svojej nízkej objemovej hmotnosti len 5,2% kým drevené prvky (konštrukčné drevo a OSB dosky) si zachovávajú nižší vplyv na úrovni 3,7%. Z hľadiska dekarbonizačnej stratégie výsledky jasne indikujú, že pre zásadné zníženie uhlíkovej stopy budovy je v budúcich projektoch kľúčové nahradenie klasických betónov ich nízko uhlíkovými ekvivalentmi s vyšším podielom vysokopecnej trosky (CEM III), optimalizácia spotreby stavebnej ocele s vysokým recyklovaným obsahom a substitúcia environmentálne najnáročnejších fasádnych prvkov (napr. hliníka) za udržateľné bio-materiály a materiály na báze obnoviteľných zdrojov.



Obr. 8.10 Analýza materiálov s najväčším environmentálnym vplyvom v percentách

8.2.3 Vyhodnotenie rozdielov pôvodného stavu a scenára 1

Na základe komplexného porovnania výsledkov životného cyklu (LCA) vykazuje Scenár 1 výrazný dekarbonizačný potenciál oproti Pôvodnému stavu. Pri hodnotení ukazovateľa GWP-celkový (vrátane započítania modulu D) došlo k zníženiu celkovej uhlíkovej stopy zo 410,84

na 358,51 kg CO_{2e}/m², čo predstavuje čistú úsporu 52,33 kg CO_{2e}/m² (pokles o cca 12,7%). Kľúčový environmentálny benefit Scenáru 1 sa koncentruje primárne vo výrobnej fáze (A1-A3), kde celkový GWP klesol o viac ako polovicu, konkrétne zo 140,64 na 75,65 kg CO_{2e}/m². Tento výsledok je spôsobený znížením fosílnych emisií viazaných v materiáloch (pokles GWP-fosílny v A1-A3 z 229,02 na 162,38 kg CO_{2e}/m²), čo potvrdzuje správnosť navrhutej materiálovej optimalizácie, ekologickejších alternatív konštrukcií a efektívnejšieho využitia surovín.

Mierne zvýšenie emisií v Scenári 1 nastáva vo fáze konca životnosti (C1-C4, nárast z 80,32 na 100,43 kg CO_{2e}/m²), čo je však priamym dôsledkom uvoľnenia väčšieho objemu skôr uskladneného biogénneho uhlíka (90,31 kg CO_{2e bio}/m² v pôvodnom stave). Prevádzkové fázy zostali v oboch scenároch identické, pričom prevádzková energia (B6) s hodnotou 151,11 kg CO_{2e}/m² zostáva pre oba prípady rovnakou výzvou. Analýza materiálového zloženia pôvodného modelu odhalila hlavné príčiny vysokej počiatočnej uhlíkovej stopy fáz A1-A3, ktorá v pôvodnom stave dosahovala až 140,64 kg CO_{2e}/m².

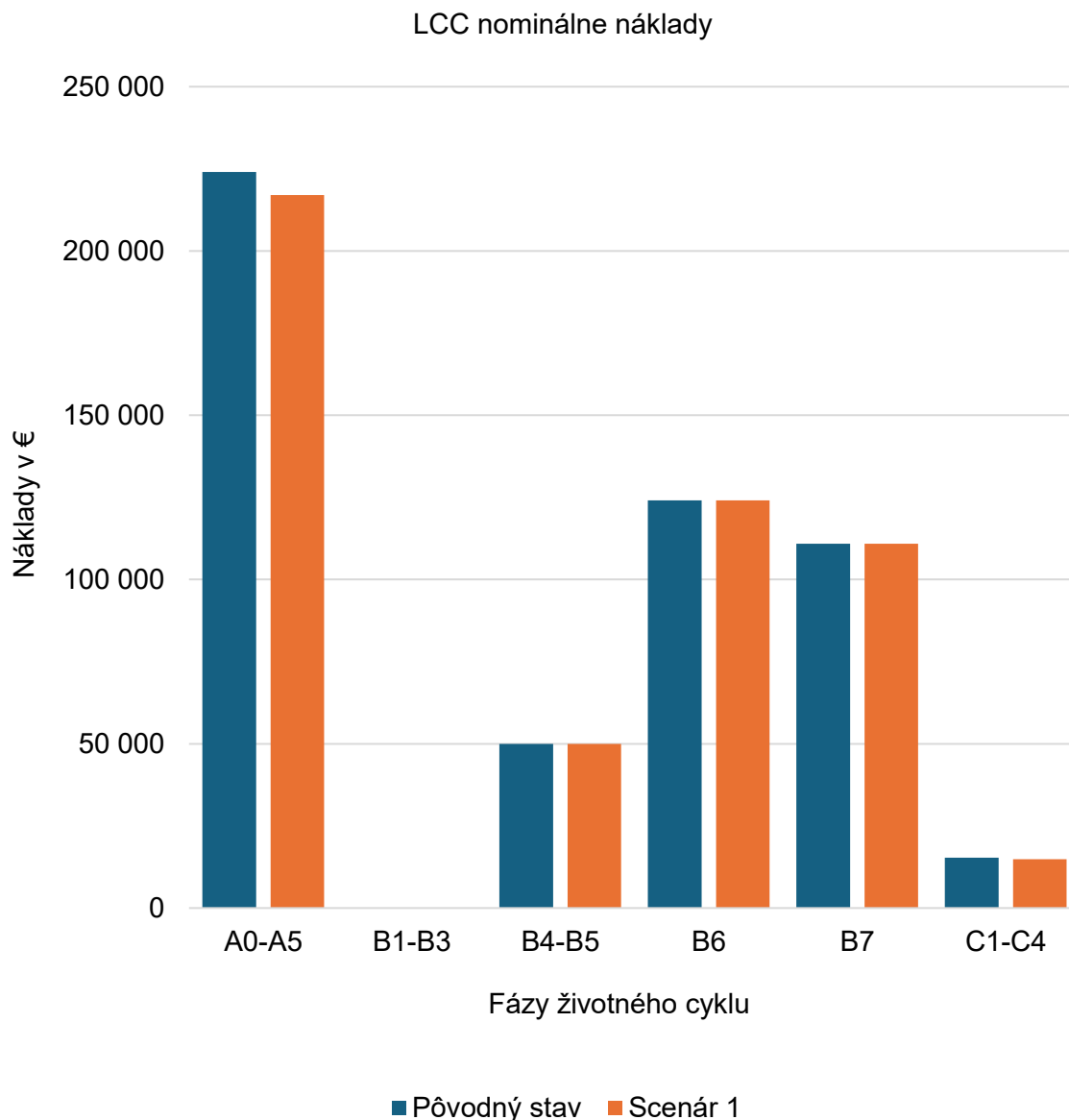
Dominantným zdrojom emisií bol masívny objem štandardného betónu triedy C20/25 a C30/37, ktorý v pôvodnom modeli generoval kritických 99 626 kg CO_{2e}. Druhou najzaťažujúcejšou zložkou boli tradičné izolačné materiály - najmä kamenná a minerálna vlna, ktoré v pôvodnom stave kumulatívne vykazovali až 45 597 kg CO_{2e} (s emisiami CO_{2e} sendvičových izolačných dosiek na úrovni 10 400 kg CO_{2e} a minerálnej vlny s hodnotou 15 000 kg CO_{2e}). Konštrukčná oceľ a výstuž v pôvodnom variante produkovali spolu 29 863 kg CO_{2e}.

Pri porovnaní s Scenárom 1 je zrejmá cielená a vysoko účinná dekarbonizačná stratégia. V Scenári 1 sa podarilo znížiť emisie betónových konštrukcií z pôvodných takmer 100 ton na 64 865 kg CO_{2e} (úspora cca 35%), čo bolo dosiahnuté prechodom na environmentálne priaznivejšie spojivá. Ešte radikálnejší posun nastal v sektore izolácií, kde v Scenári 1 nahradili energeticky náročnú kamennú vlnu ekologickejšie materiály s nižším emisným faktorom (napr. fúkaná celulóza, drevovláknité izolácie a optimalizované PIR panely), čím celková stopa izolácií klesla z pôvodných 45,5 tony na 9 054 kg CO_{2e} (pokles o viac ako 80%).

Miernu úsporu dosiahla aj výstuž. Táto koordinovaná materiálová substitúcia a redukcia cementových a minerálnych produktov v prospech nízkouhlíkových riešení je dôvodom, prečo Scenár 1 dokázal znížiť viazanú uhlíkovú stopu materiálov vo fáze výroby takmer o polovicu. Celkovo možno konštatovať, že Scenár 1 úspešne plní ciele dekarbonizácie projektu, keďže po zohľadnení celého životného cyklu dokázal zásadným spôsobom eliminovať primárne fosílné emisie zabudované v konštrukciách a posunúť kultúrny dom smerom k prísnejším nízkouhlíkovým štandardom.

8.2.4 Vyhodnotenie nákladov na životný cyklus

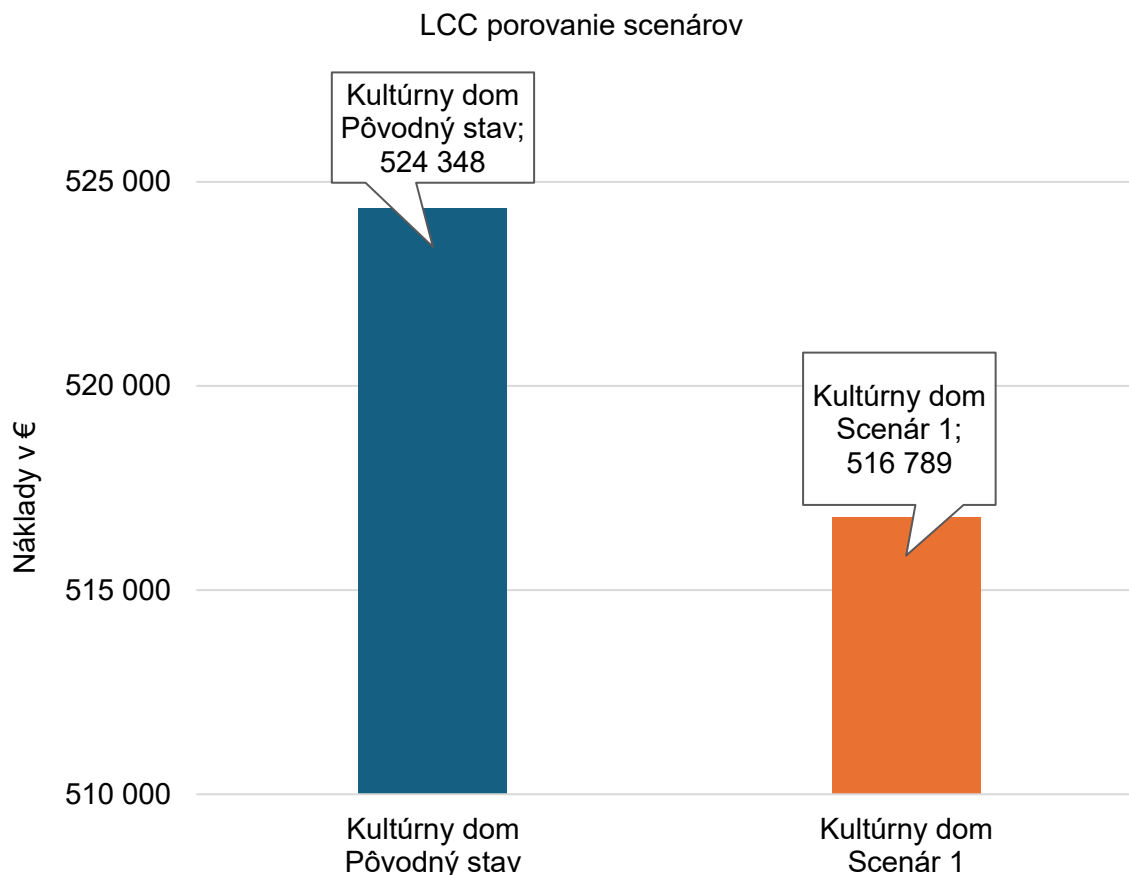
V rámci ekonomického vyhodnotenia projektu boli analyzované celkové nominálne náklady na životný cyklus (LCC) vyjadrené v absolútnych finančných hodnotách v eurách (€).



Obr. 8.11 Výsledky LCC pre analyzované scenáre kultúrneho domu

Celková finančná náročnosť životného cyklu budovy klesla z pôvodných 524 348,17 € v Pôvodnom stave na 505 889,20 € v Scenári 1, čo pre investora predstavuje značnú úsporu. Najvýraznejší finančný rozdiel možno vidieť hneď v úvodnej investičnej fáze obstarania a realizácie stavby (A0-A5), kde náklady klesli z pôvodných 224 065,96 € na 216 992,58 €. Táto úspora vo výške 7 073,38 € potvrdzuje, že materiálová optimalizácia a substitúcia v Scenári 1 (napríklad redukcia nákladných izolácií z kamennej vlny a prechod na alternatívne ekologické riešenia) nielen znižuje zabudovaný uhlík, ale zároveň optimalizuje počiatočné investičné výdavky. V prevádzkovej fáze vykazujú oba porovnávané varianty zhodné ekonomické zaťaženie. Náklady na priebežnú údržbu, opravy a obnovu stavebných prvkov (B4-B5) sú fixne kalkulované na úrovni 49 963,01 €. Najväčšie finančné zaťaženie počas celého cyklu užívania budovy predstavujú náklady na prevádzkovú energiu (B6) vo výške 124 050,49 € a prevádzková spotreba vody (B7) na úrovni 110 886,73 €, zatiaľ čo fáza bežného užívania (B1-B3) je pre oba modely nulová. V záverečnej fáze konca životnosti (C1-C4) prináša Scenár 1

dodatočnú finančnú korekciu smerom nadol, keďže náklady na dekonštrukciu, separáciu a likvidáciu odpadov klesli z 15 381,98 € na 14 896,39 €. Výsledná analýza jasne preukazuje, že Scenár 1 je z ekonomického pohľadu efektívnejší a udržateľnejší, pričom dokazuje priamu koreláciu medzi úspešnou dekarbonizáciou a znížením celkových nákladov na vlastníctvo budovy.



Obr. 8.12 Porovnanie výsledkov LCC pre analyzované scenáre kultúrneho domu

Analýza celkových životných nákladov ukázala, že finančná náročnosť životného cyklu budovy v Scenári 1 klesla. Tento pokles bol generovaný predovšetkým v úvodnej investičnej a realizačnej fáze, čo potvrdzuje, že navrhnuté bio-materiály boli ekonomicky výhodnejšie než pôvodne navrhované riešenia. V prevádzkovej fáze, ako aj vo fáze konca životnosti vykazuje nový scenár stabilné až mierne úspornejšie hodnotenia. Scenár 1 tak v plnom rozsahu validuje ciele projektu a preukazuje priamu koreláciu medzi úspešným znižovaním uhlíkovej stopy a optimalizáciou celkových nákladov na vlastníctvo budovy.

8.2.5 Výsledky, diskusia a komplexné zhodnotenie scenárov

Záverečné porovnanie oboch modelov v rámci dekarbonizácie potvrdzuje, že hoci obidva prístupy zhodne zachovávajú vysokú prevádzkovú náročnosť pôvodného stavu v module prevádzkovej energie (keďže Scenár 1 sa primárne nesústredil na energetický manažment a technologické úspory, ale na materiálovú transformáciu obalu budovy a konštrukcií), navrhovaný Scenár 1 dosahuje signifikantne vyššiu úroveň environmentálnej a ekonomickej excelentnosti v oblasti zabudovaného uhlíka a počiatočných nákladov. Použitie progresívnych cementových zmesí s vysokým podielom vysokopecnej trosky, optimalizácia stavebnej ocele,

redukcia syntetických polymérov a integrácia fúkaných celulózových či drevovláknitých izolácií účinne tlmia negatívne dopady výroby a ukladajú biogénny uhlík priamo do telesa budovy. Z hľadiska dlhodobých cieľov dekarbonizácie stavebného sektora na Slovensku sa preto implementácia postupov zo Scenáru 1 javí ako progresívne riešenie pre udržateľnú obnovu verejnej infraštruktúry.

Komplexné posúdenie dekarbonizačného a ekonomického potenciálu obnovy budovy kultúrneho domu prebiehalo formou komparácie dvoch základných stavov: pôvodného stavu objektu a optimalizovaného Scenáru 1. Hlavný prínos analýzy spočíva v podrobnom rozbere viazanej uhlíkovej stopy stavebných konštrukcií a v nákladoch ich životného cyklu (LCC) v rámci hodnotiaceho obdobia. Z hľadiska dekarbonizácie a indikátorov potenciálu globálneho otepľovania (GWP) odhaľujú výsledky zásadné synergie medzi ekologickou voľbou materiálov, rešpektovaním existujúcich konštrukcií a úsporou emisií skleníkových plynov. Vo výrobnej fáze (moduly A1-A3) vykazuje pôvodný stav vysoké hodnoty emisií, ktoré sú spôsobené použitím betónu a energeticky náročných izolačných systémov na báze kamennej minerálnej vlny. V Scenári 1 sa vďaka zachovaniu nosného systému a cielenej výmene materiálov za nízko uhlíkové alternatívy podarilo túto hodnotu radikálne znížiť, čo predstavuje zásadnú úsporu zabudovaného uhlíka ešte pred zohľadnením samotnej prevádzky. Environmentálny benefit Scenáru 1 významne dopĺňa integrácia prírodných izolácií na báze celulózy a drevovlákná, čo sa prejavuje v kategórii biogénneho otepľovania (GWP-biogénny), kde fixácia atmosférického uhlíka vo výrobnej fáze dosahuje výrazné záporné hodnoty. Hoci sa podstatná časť tohto viazaného uhlíka prirodzene uvoľňuje vo fáze konca životnosti budovy (moduly C1-C4), kedy Scenár 1 vykazuje vyššie biogénne emisie oproti pôvodnému stavu z dôvodu dekonštrukcie organických materiálov, celková bilancia životného cyklu jednoznačne hovorí v prospech navrhnutého riešenia. Modul D, ktorý reflektuje prínosy a zaťaženia mimo hraníc systému, navyše potvrdzuje smerovanie k princípom cirkulárnej ekonomiky, nakoľko Scenár 1 generuje významný environmentálny kredit vďaka vysokej recyklovateľnosti a materiálovej adaptabilite nových vrstiev. V konečnom hodnotení za celý životný cyklus budovy tak Scenár 1 prináša čistú uhlíkovú úsporu a pokles celkovej environmentálnej globálnej stopy. Ekonomické hodnotenie nákladov životného cyklu (LCC) prináša do analýzy kľúčový argument finančnej udržateľnosti tohto dekarbonizačného prístupu. V stavebnej praxi sa bežne očakáva, že ekologizácia materiálov a substitúcia konvenčných produktov zvýši počiatočné investície. Pri tomto objekte však zachovanie pôvodného materiálového štandardu budovy z dlhodobého hľadiska reprezentuje neefektívne ekonomické zaťaženie. Realizácia obnovy v navrhovanom Scenári 1 si totiž vyžiadala nižšie počiatočné stavebné náklady (moduly A0-A5) v porovnaní s pôvodným referenčným modelom. Tento pokles vstupných investícií jednoznačne dokazuje finančnú opodstatnenosť dekarbonizácie formou citlivej rekonštrukcie: eliminácia potreby kompletnej demolácie a následnej výstavby nových masívnych nosných konštrukcií z primárnych surovín, spolu s náhradou predražených hrubých syntetických vrstiev, ušetrila významné množstvo finančných prostriedkov aj emisií zároveň. Finančné zaťaženie vo fáze užívania z hľadiska periodickej obnovy a opráv konštrukcií a materiálov (moduly B4-B5) zostalo v oboch scenároch stabilizované na identickej hodnote, rovnako ako výdavky na prevádzkovú vodu v module B7. Absolútnym ekonomickým jadrom fázy užívania však zostáva modul B6, ktorý v oboch prípadoch zhodne a najvýraznejšou mierou zaťažuje rozpočet. Tento ekonomický ukazovateľ jasne demonštruje limity Scenáru 1 a potvrdzuje, že finančné prostriedky ušetrené v realizačnej fáze poskytujú ideálny investičný kapitál. Fáza konca životnosti (moduly C1-C4) už rozpočty ovplyvňuje v menšej miere, avšak aj tu si Scenár 1 vyžaduje nižšie finančné prostriedky ako pôvodný stav. Tento pokles priamo súvisí s lepšou

demontovateľnosťou, selektívnou likvidáciou a vyšším recyklačným potenciálom novonavrhnutých konštrukčných systémov. V celkovom sumáre nominálnych nákladov LCC tak Scenár 1 predstavuje ekonomicky optimálnejšiu alternatívu, čím samospráve prináša celkovú finančnú úsporu pri súčasnom znížení environmentálneho dopadu na klímu.

8.2.6 Diskusia

Kľúčovým bodom na diskusiu je výrazný úspech Scenáru 1 v znížení zabudovaného uhlíka vo výrobnej fáze (A1-A3) o viac ako polovicu. Tento pokles jasne demonštruje, že najúčinnším dekarbonizačným nástrojom pri obnove fondu verejných budov nie je samotná mechanická aplikácia nových "bio-materiálov", ale v prvom rade rešpektovanie a maximálne zachovanie existujúcej materiálovej substance budovy. Keďže emisie pôvodného masívneho nosného systému, betónových základov a skeletu kultúrneho domu už boli v minulosti uvoľnené, ich integrácia do nového životného cyklu namiesto demolácie predstavuje okamžitú úsporu tisícov kilogramov fosílného CO_{2e}. Z materiálového hľadiska k tomu prispieva aj nahradenie tradičných betónových zmesí nízkouhlíkovým betónom s vysokou substitúciou trosky a optimalizácia profilov stavebnej ocele. Tento prístup je v úplnom súlade s princípmi obehového hospodárstva a exaktne ukazuje, kde by mali samosprávy hľadať primárne environmentálne úspory pri plánovaní rekonštrukcií. V praxi sa často stáva, že kvôli obmedzeným rozpočtom alebo nesprávnemu manažmentu projektov dôjde len k čiastočným úpravám. Výsledky tejto štúdie dokazujú, že hoci materiálová dekarbonizácia dokáže znížiť globálnu environmentálnu stopu životného cyklu takmer o polovicu, bez následného zásahu do energetických systémov budovy (predovšetkým prostredníctvom integrácie vysokoúčinných technológií, ako je posudzované tepelné čerpadlo, a eliminácie fosílny závislosti) zostáva potenciál budovy z hľadiska dlhodobej udržateľnosti otvorený. Z hľadiska ekonomického hodnotenia LCC výsledky búrajú zažitý mýtus, že environmentálne uvedomelé stavebné postupy automaticky predražujú počiatočnú realizáciu. Pokles celkových investičných nákladov v moduloch A0-A5 v Scenári 1 jasne ukazuje, že sanácia, materiálová optimalizácia a prechod od neefektívnych tepelných izolácií z kamennej vlny k progresívnym izoláciám typu fúkanej celulózy či cielených PIR panelov je finančne výhodnejšia než konvenčný prístup. Významným bodom diskusie je aj eliminácia rizikových syntetických materiálov; napríklad nahradenie environmentálne zaťažujúcich PVC strešných hydroizolácií za uhlíkovo prijateľnejšie alternatívy dokáže eliminovať environmentálne zaťaženie. Posledným dôležitým aspektom na diskusiu je správanie sa biogénneho uhlíka na konci životného cyklu (moduly C1-C4). Hoci použitie prírodných izolácií a aglomerovaných drevených prvkov v Scenári 1 prináša benefit vo forme viazania atmosférického uhlíka počas rastu biomasy a znižuje fosílny GWP vo fáze výroby, dáta jasne ukazujú nárast emisií pri dekonštrukcii a demolácii, kedy sa tento uhlík vracia späť do bilancie. Aby bol benefit bio-materiálov skutočne stopercentný, je nevyhnutné, aby tieto materiály po skončení životnosti kultúrneho domu nekončili na skládkach (kde pri anaeróbnom rozklade uvoľňujú skleníkové plyny), ale boli opätovne materiálovo zhodnotené, recyklované alebo energeticky transformované s využitím moderných technológií. Tento predpoklad v modeli plne potvrdzuje aj vysoký recyklačný a energetický kredit vykázaný mimo hraníc systému v module D, čím sa uzatvára udržateľný kruh materiálového toku tohto projektu.

Literatúra

- a. LIAO, Haolan; REN, Rong; LI, Lu. Existing building renovation: a review of barriers to economic and environmental benefits. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20,5: 4058.
- b. FILČÁK, Richard; ŠKOBLA, Daniel. TOWARDS ACHIEVING CLIMATE NEUTRALITY FOR SLOVAKIA IN 2050: ANALYSIS OF THE SITUATION AND KEY CHALLENGES. *FAR: Forecast, Analysis & Recommendations*, 2023, 15,1: 49-64.
- c. REČKA, Lukáš; MÁCA, Vojtěch; ŠČASNÝ, Milan. Green deal and carbon neutrality assessment of Czechia. *Energies*, 2023, 16,5: 2152.
- d. NAJJAR, Mohammad K., et al. Life cycle assessment methodology integrated with BIM as a decision-making tool at early-stages of building design. *International Journal of Construction Management*, 2022, 22,4: 541-555.
- e. BERTINO, Gaetano, et al. Fundamentals of building deconstruction as a circular economy strategy for the reuse of construction materials. *Applied sciences*, 2021, 11,3: 939.
- f. RUPAL, Ashmita; TANK, Ishan. Materials Efficiency in Construction: Development, Selection, and Life Cycle Assessment. In: *Handbook of Construction Project Management*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. p. 1461-1486.
- g. KERTSMIK, Kadri-Ann, et al. Low carbon emission renovation of historical residential buildings. *Energy Reports*, 2024, 11: 3836-3847.
- h. MORALES, Michele FD; KOUHIROSTAMKOLAEI, Mahtab; RIES, Robert J. Retrospective dynamic life cycle assessment of residential heating and cooling systems in four locations in the United States. *Energy and Buildings*, 2023, 295: 113272.
- i. CUCE, Pinar Mert. Sustainable insulation technologies for low-carbon buildings: From past to present. *Sustainability*, 2025, 17,11: 5176.
- j. ERZEN, Buket, et al. Innovative insulation materials: a comprehensive review of current trends, challenges, and future directions in sustainable building technologies. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2025, 64,10: 1538-1561.
- k. GYIMAH, Kwabena Abrokwa; GYIMAH, Amma Birago Kantanka; KONTOR, Seth Mensah. Circularity in retrofitting and renovation of green buildings. In: *Research Companion on Circularity, Deconstruction and Adaptability in Green Buildings*. Edward Elgar Publishing, 2026. p. 144-154.
- l. STN 730540-2+Z1+Z2 2019 Thermal protection of buildings Thermal properties of building structures and buildings.
2. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2006.
3. ISO 14044:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2006.
4. EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021. Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2021.
5. ISO 14025:2006. Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2006.
6. ISO 14067:2018. Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018.

7. ISO 14020:2022. Environmental statements and programmes for products — Principles and general requirements. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2022.

9 Administratívna budova – analýza systémov s výrobou tepla na základe sledovania realizovaných opatrení a vyhodnocovania prevádzky

Pre účely tejto práce sa použili ako referenčná budova objekt administratívnej budovy HONORS v Košiciach (Obr. 9.1). Budova stojí v centre mesta, jej prevádzka je celoročná, s útlmami cez víkend. Budova je priebežne sledovaná z pohľadu spotrieb energií od roku 1996. Vlastník budovy za účelom zníženia energetickej náročnosti realizoval postupné ciele úpravy, na budove a systéme zásobovania teplom.

Parametre budovy:

Adresa:	Murgašova 3, Košice
Podlahová plocha:	4 500 m ²
Vykurovaná plocha:	4 000 m ²
Počet podlaží:	6 nadzemných podlaží + 1 podzemné podlažie
Počet vykurovaných podlaží:	6 nadzemných podlaží + prístavba 2 podlažia



Obr. 9.2 Pohľad na skúmanú administratívnu budovu HONORS a ukážka na mape

9.1 Postupnosť realizovaných opatrení

Realizované opatrenia v jednotlivých rokoch sú:

1. 1996 = VÝCHODZÍ STAV PRE POROVNÁVANIE

Je začiatok sledovania energetickej prevádzky budovy. Budova je murovaná bez zateplenia, okná zdvojené drevené, zásobovanie vykurovania je cez OST (Odovzdávaciu Stanicu Tepla) z CZT (Centralizované Zásobovanie Teplom). Dodávateľom tepla je TEHO (Tepelné Hospodárstvo Košice). Technológia OST je zastaraná, výmenníky sú protiprúdové rúrové. Regulácia tepla ekvitermická, centrálna pre celú budovu, bez možnosti miestnej regulácie, avšak s meraním dodaného množstva tepla. Teplo je dodávané súčasne aj do vedľa stojacich budov. Ohrev teplej vody je zabezpečovaný tiež v OST, s rozvodmi s cirkuláciou v budove.

2. 1997 = REKONŠTRUKCIA ZDROJA TEPLA A JEHO RIADENIA

Rekonštrukcia OST na novú, modernú s doskovými výmenníkmi tepla a automatickou reguláciou. Zároveň v budove sú zrealizované zmiešavacie uzly vykurovacej vody pre vetvy

východ, západ, a prístavba z južnej strany. Teplá voda je vyčlenená z ohrevu v OST, a boli zrealizované lokálne prietokové ohrievače elektrické. Vzhľadom k účelu budovy a nízkej potrebe teplej vody je toto riešenie energeticky výhodnejšie. Investične rekonštrukciu zdroja zabezpečoval dodávateľ tepla TEHO.

3. 1998 = ZATEPLENIE BUDOVY A VÝMENA OKIEN

Výmena okien bola za plastové trojkomorové. Zateplenie sa realizovalo na obvodových stenách a streche objektu. Podlaha prízemia je nad nevykurovaným suterénom, napriek tomu sa strop suterénu nezateploval.

4. 2005 = TERMOSTATIZÁCIA + HYDRAULICKÉ VYREGULOVANIE

Termostatizácia obsahovala osadenie a prednastavenie termostatických radiátorových ventilov na každé vykurovacie teleso. Hydraulické vyregulovanie spočívalo v dynamickej regulácii osadením regulátorov diferenčného tlaku na každú stúpačku vykurovania. Termostatické hlavice umožnili individuálnu reguláciu teploty v každej vykurovanej miestnosti.

5. 2008 = ZÁMENA ZDROJA TEPLA ZA TEPELNÉ ČERPADLO (systém radiátorov ostáva)

Všetky predchádzajúce opatrenia boli realizované na stavebných konštrukciách budovy, alebo na zlepšení a riadení regulácie systému vykurovania. V týchto oblastiach sa tak vyčerpali všetky efektívne opatrenia. Po vypracovaní viacerých energetických a ekonomických štúdií sme sa rozhodli na výmenu zdroja tepla. Bola zrealizovaná náhrada OST za strojovňu s tepelným čerpadlom voda/voda na elektrický pohon. Investične bola z finančných zdrojov majiteľa budovy.

6. 2012 = ZÁMENA SYSTÉMU VYKUROVANIA (zmena radiátorov na stropné vykurovanie)

Celá myšlienka vychádzala z predpokladu zvýšenia prevádzkovej účinnosti tepelného čerpadla pri výrobe tepla a zavedenia novej služby, pasívneho chladenia pre letné mesiace. Požiadavky sme zabezpečili montážou stropného systému (v našom prípade kapilárne rohože). Systém zabezpečuje nízkoteplotné vykurovanie v zimných mesiacoch pomocou TČ, a vysokoteplotné chladenie pasívnym spôsobom bez nutnosti vyrábať chlad.

7. 2024 = REKONŠTRUKCIA OSVETLENIA (výmena žiarivkových osvetľovacích telies za LED)

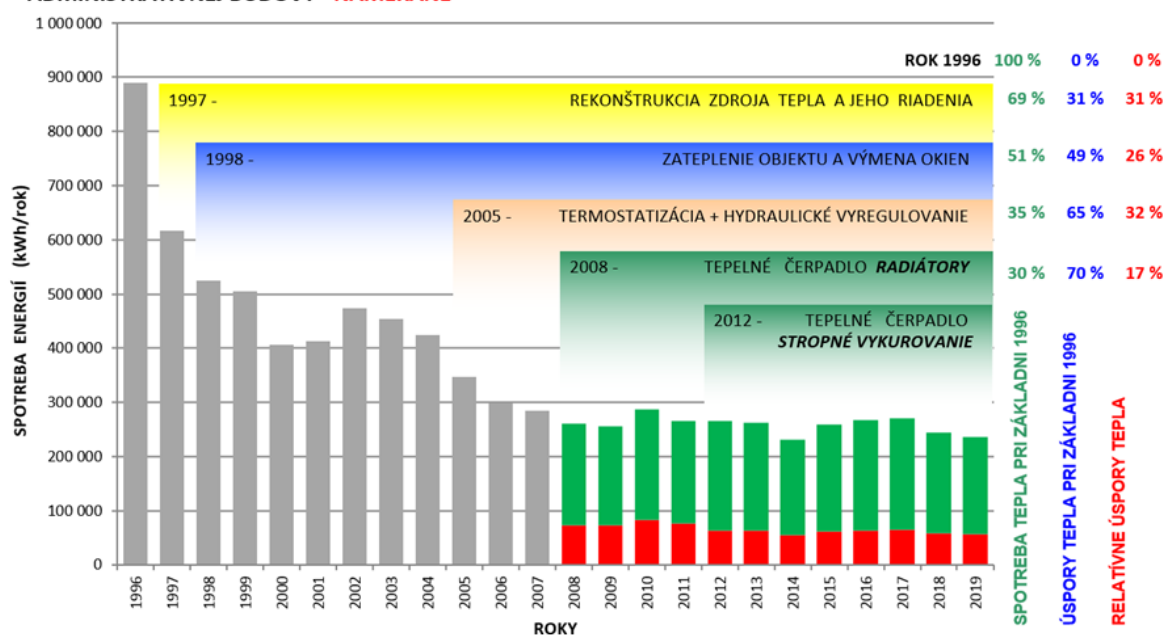
Budova je zásobovaná energiami len na báze elektriny. Zníženie jej celkovej spotreby sa zabezpečilo inštaláciou LED osvetlenia v celom priestore objektu.

Monitorovanie prevádzkových stavov

Zvolené kritériá:

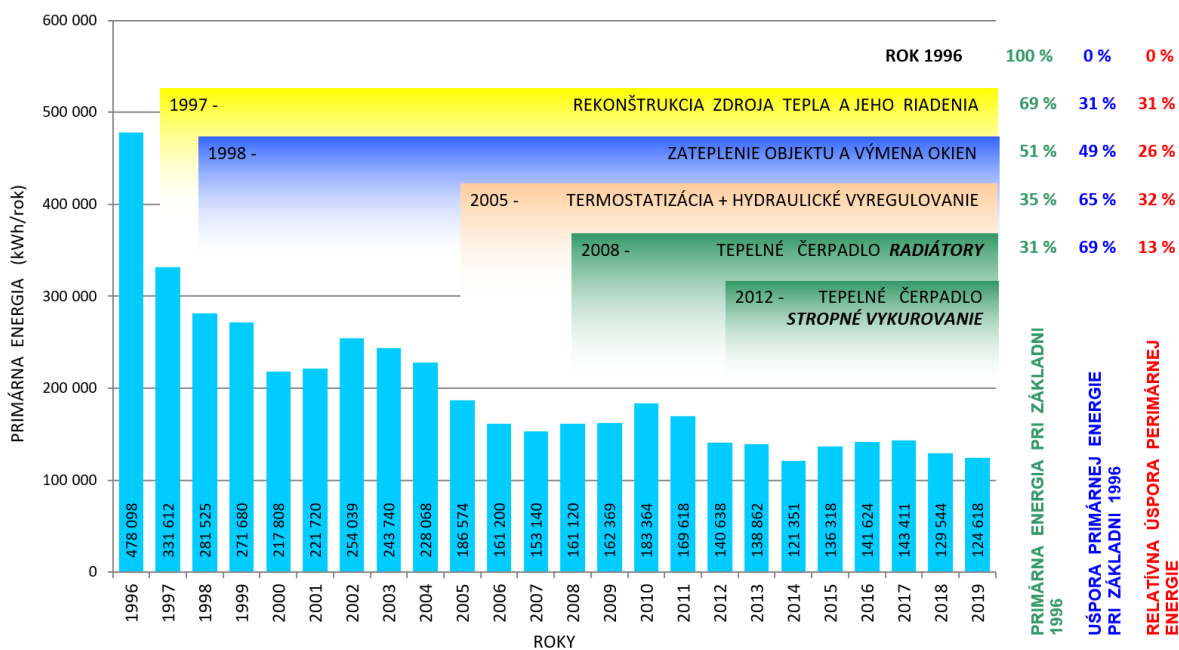
- Priebeh spotreby tepla na vykurovanie
- Potreba primárnej energie (zmenou zdroja tepla sa mení aj druh energie, preto je porovnávacím kritériom primárna energia)
- Produkcia emisií CO₂

PRIEBEH SPOTREBY TEPLA NA VYKUROVANIE V ROKOCH 1996-2019
ADMINISTRATÍVNEJ BUDOVY - NAMERANÉ

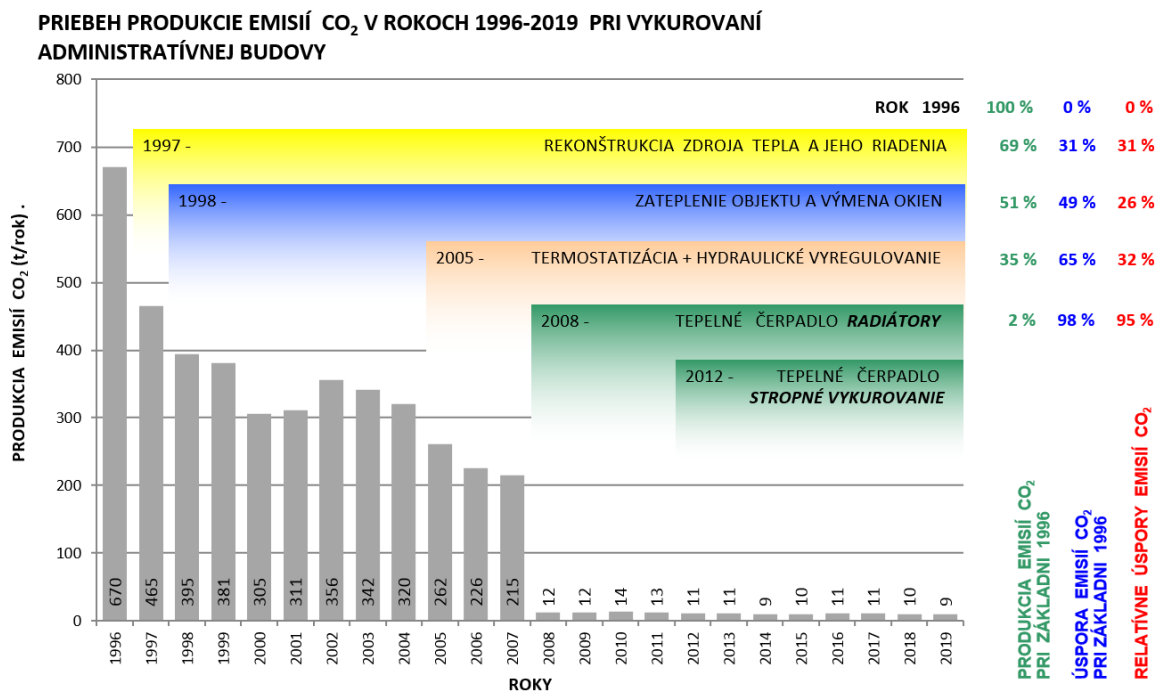


Obr. 9.2 Priebek spotreby tepla

PRIEBEH SPOTREBY PRIMÁRNEJ ENERGIE NA VYKUROVANIE V ROKOCH 1996-2019
ADMINISTRATÍVNEJ BUDOVY



Obr. 9.3 Priebek spotreby primárnej energie



Obr. 9.4 Priebeg produkcie emisií CO₂

9.2 Vyhodnotenie realizovaných opatrení

Úspory realizovaných opatrení je možné stručne definovať:

1. Úspory tepla na vykurovanie po opatreniach 1 – 6 (1996 – 2025) = 70 %
2. Úspora primárnej energie po opatreniach 1 – 6 (1996 – 2025) = 69 %
3. Úspora emisií CO₂ po opatreniach 1 – 6 (1996 – 2025) = 98 %

Úspory tepla boli zistené kalorimetrickým meraním na odbernom mieste/zdroji tepla.

Primárna energia je prepočítaná z energie spotrebovanej, pomocou faktorov primárnej energie, ktoré definuje vyhláška Ministerstva dopravy a výstavby č. 364/2012 Z.z.

Emisie CO₂ sú prepočítané z energie spotrebovanej, na základe druhu použitej energie a faktorov emisií CO₂ podľa vyhlášky 364/2012 Z.z.

Opatrenie 7 v tomto porovnaní nefiguruje, nakoľko do systému vstupuje aj osvetlenie, ktoré v rokoch 1996-2024 nebolo hodnotené.

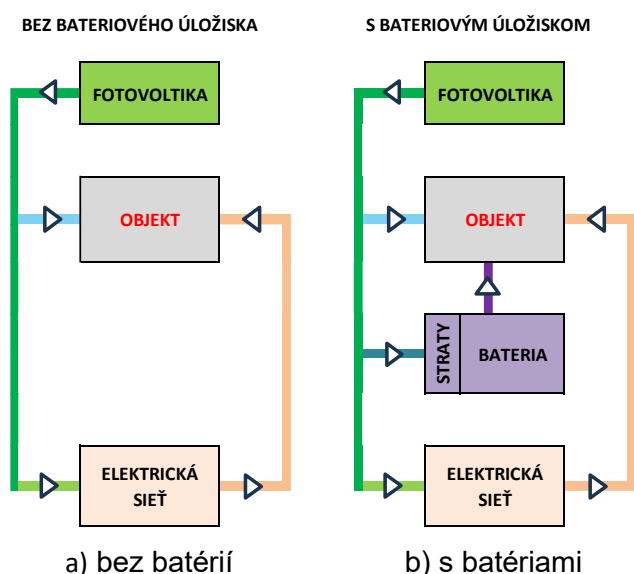
10 Budovy pre školstvo - analýza školských objektov z hľadiska spotreby elektrickej energie počas prevádzky a sledovanie realizovaných opatrení

Pre účely tejto práce sa použili ako referenčné budovy pre školstvo. Jedná sa o základné školy, materské školy a jasle. V objektoch bol navrhnutý a nainštalovaný systém fotovoltických panelov v kombinácii s batériovým úložiskom. Návrh realizácie vychádzal iba z údajov o nameranej spotrebe elektrickej energie v mesačných intervaloch z roku 2022. Odberový denný diagram nebol známy. Systémy boli spustené do prevádzky koncom roka 2023. V súčasnosti sú k dispozícii údaje za celý rok 2024 a 2025. Údaje sú v intervale 5 minút. Objekty sa nachádzajú po celom južnom Slovensku. Z počtu 29 objektov do analýzy sa vybralo 19 objektov, pre ktoré sú údaje úplné a reprezentatívne.

10.1 Ciele analýzy

Ciele analýzy sú nasledovné:

1. Poznať spotrebiče elektrickej energie (vykurovanie, ohrev teplej vody, chladenie, príprava jedál, bežná prevádzka objektov,...)
2. Merať presne odberový diagram elektrickej energie v intervale 5 minút
3. Toky elektrickej energie vyrobené fotovoltikou = priama spotreba v objekte, uloženie do batériového úložiska, dodávka prebytkov do rozvodnej elektrickej siete
4. Batériové úložisko = priebeh nabíjania batérií, priebeh vybíjania batérií, stav nabitia batérií
5. Doplnenie chýbajúcej elektrickej energie z distribučnej siete
6. Všetky merané údaje sú v intervale 5 minút.
7. Vyhodnotenie energetických a environmentálnych prínosov a úspor
8. Optimalizácia návrhových modelov a využitia systému (FV panely – batérie – distribučná sieť)
9. Porovnanie prevádzky s batériovým úložiskom a bez batériového úložiska



Obr. 10.1 Energetická schéma zásobovania objektu elektrinou

Všetky objekty sú nainštalované podľa schémy (Obr. 10.1) s fotovoltaickými panelmi a batériami. Batérie v prevádzke sa nabíjajú až po úroveň 100%. Minimálne nabitie batérií sa udržiava na minimálnej hodnote 10%. V tabuľke 10.1 sú uvedené merané dáta vzťahnuté na celoročnú bilanciu. Vychádzajú z údajov za rok 2025 s intervalom merania 5 minút. Vyhodnotenie roka 2024 sa neuvádza.

Tabuľka 10.1 Priebeh ročných bilancií pri posudzovaných objektoch

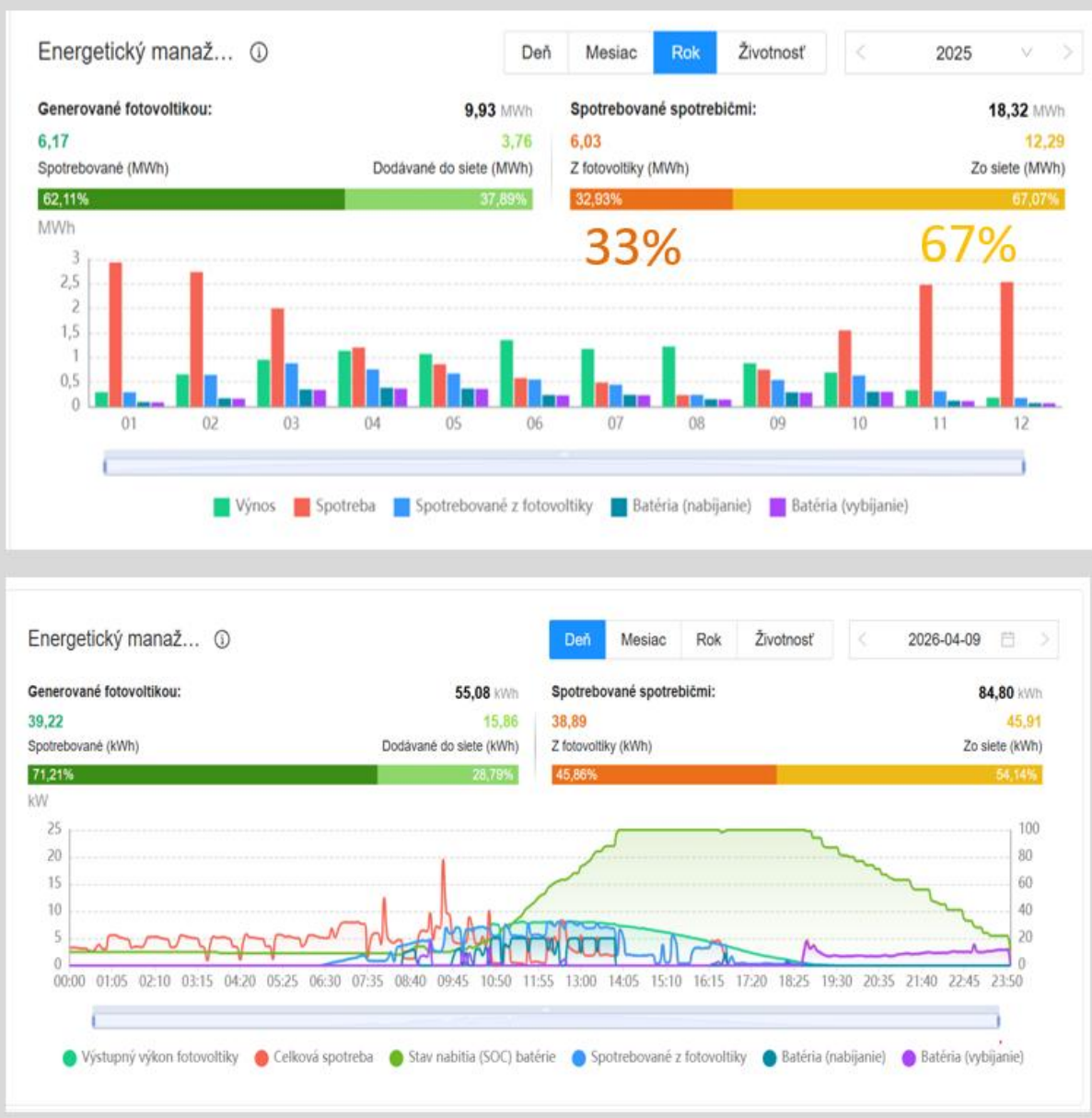
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
rok	2025	parametre FV		FV VYROBA (dodávka)			SPOTREBA OBJEKTU			BAT		FV		BAT + FV	
		FV	BAT	do obj.	do siete	SPOLU	z FV	zo siete	SPOLU	dodávky EE do objektu (podiel na celkovej spotrebe EE)					
P.Č.	MIESTO	kWp	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh/rok	kWh/rok	kWh/rok	kWh	%	kWh	%	kWh	%
1	KEŤ	9.03	15.0	5 170	4 360	9 530	4 970	3 230	8 200	2 325	28.4%	2 645	32.3%	4 970	60.6%
2	ŽELIEZOVCE	9.96	15.0	6 140	5 880	12 020	6 000	2 080	8 080	2 384	29.5%	3 616	44.8%	6 000	74.3%
3	PRIBETA	9.03	15.0	6 170	3 760	9 930	6 030	12 290	18 320	2 664	14.5%	3 366	18.4%	6 030	32.9%
4	KOMARNO	9.96	15.0	7 300	4 180	11 480	7 120	30 300	37 420	2 668	7.1%	4 452	11.9%	7 120	19.0%
5	ŠAMORÍN	9.89	15.0	11 690	4 970	16 660	11 610	28 070	39 680	2 820	7.1%	8 790	22.2%	11 610	29.3%
6	CHOTÍN	9.03	15.0	5 880	3 180	9 060	6 010	4 780	10 790	3 037	28.1%	2 973	27.6%	6 010	55.7%
7	VLČANY	6.88	10.0	7 230	4 540	11 770	7 160	14 390	21 550	2 505	11.6%	4 655	21.6%	7 160	33.2%
8	DUN. STREDA	9.03	15.0	6 080	4 140	10 220	5 870	8 480	14 350	2 607	18.2%	3 263	22.7%	5 870	40.9%
9	MARTOVCE	6.88	10.0	7 380	4 490	11 870	7 280	6 830	14 110	2 485	17.6%	4 795	34.0%	7 280	51.6%
10	DOLNÝ ŠTÁL	9.98	15.0	6 330	5 080	11 410	6 160	13 710	19 870	2 679	13.5%	3 481	17.5%	6 160	31.0%
11	ZŠ R.SOBOTA	12.04	15.0	3 440	9 970	13 410	3 270	1 190	4 460	1 846	41.4%	1 424	31.9%	3 270	73.3%
12	KOŠICE	5.16	5.0	1 770	650	2 420	1 730	1 760	3 490	945	27.1%	785	22.5%	1 730	49.6%
13	M.KAMENEC	5.16	5.0	1 260	3 210	4 470	1 240	566	1 806	826	45.7%	414	22.9%	1 240	68.7%
14	PAVLOVCE	5.16	10.0	3 330	2 190	5 520	3 230	2 520	5 750	1 747	30.4%	1 483	25.8%	3 230	56.2%
15	MŠ R.SOBOTA	12.04	15.0	4 680	8 060	12 740	4 590	2 020	6 610	2 376	35.9%	2 214	33.5%	4 590	69.4%
16	TORNALÁ	2.58	5.0	1 420	1 100	2 520	1 380	1 430	2 810	809	28.8%	571	20.3%	1 380	49.1%
17	V.KAPUŠANY	8.60	15.0	7 720	5 460	13 180	7 580	6 620	14 200	2 695	19.0%	4 885	34.4%	7 580	53.4%
18	CHANAVA	5.16	5.0	1 490	3 230	4 720	1 450	778	2 228	779	35.0%	671	30.1%	1 450	65.1%
19	SYNODY	10.32	15.0	1 190	5 460	6 650	1 120	255	1 375	810	58.9%	310	22.5%	1 120	81.5%
SUMA				95 670	83 910	179 580	93 800	141 299	235 099	39 007	16.6%	54 793	23.3%	93 800	39.9%
										min	7.1%	min	11.9%	min	19.0%
										max	58.9%	max	44.8%	max	81.5%

Komentár k tabuľke č.

Stĺpce:

- č.1 poradové číslo objektu
- č.2 miesto posudzovaného objektu
- č.3 výkon fotovoltaickej elektrárne
- č.4 úložná kapacita batérií
- č.5 EE vyrobená vo FV paneloch dodaná do objektu (= do priamej spotreby a do batérií bez strát)
- č.6 EE vyrobená vo FV paneloch dodaná do siete distribučnej spoločnosti
- č.7 EE vyrobená spolu (č5 + č6)
- č.8 spotrebovaná EE vyrobená vo FV dodaná do objektu (priamo + cez batérie) zohľadnené straty
- č.9 spotrebovaná EE odobratá a dodaná do objektu z distribučnej siete.
- č.10 spotrebované EE v objekte spolu (č8 + č9)
- č.11 spotrebovaná EE v objekte dodaná cez batérie kWh
- č.12 spotrebovaná EE v objekte dodaná cez batérie (% - podiel na celkovej spotrebe objektu)
- č.13 spotrebovaná EE v objekte dodaná priamo z FV (kWh)
- č.14 spotrebovaná EE v objekte dodaná priamo z FV (% - podiel na celkovej spotrebe objektu)
- č.15 spotrebovaná EE v objekte dodaná priamo z FV + batérií (kWh)
- č.16 spotrebovaná EE v objekte dodaná priamo z FV + BAT (% - podiel na celkovej spotrebe obj.)

Pribeta



- Ročná bilancia po mesiacoch
- Ukážka pracovného dňa 9.apríl 2026 s nameranými parametrami

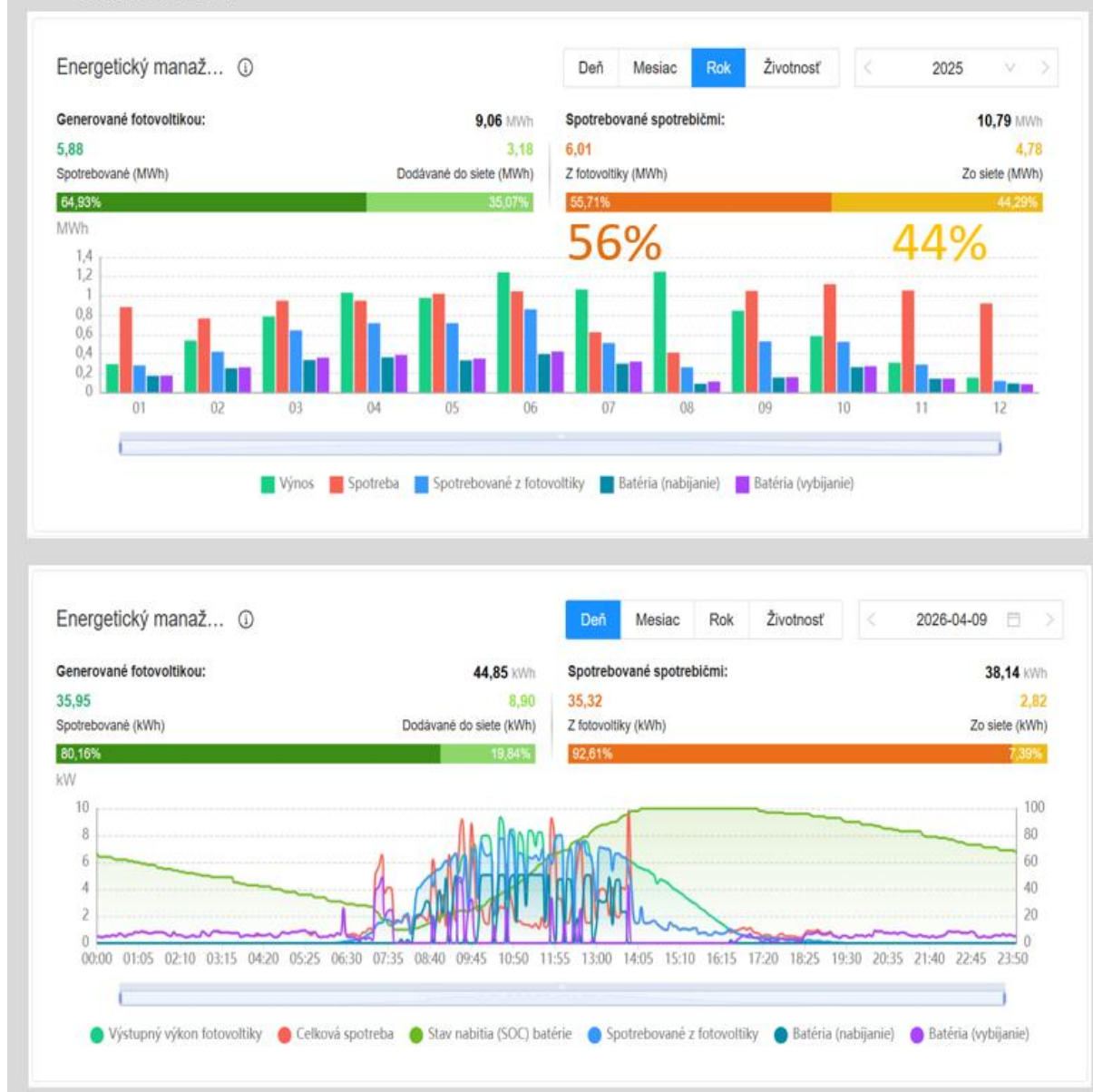
Obr. 10.2 Objekt PRIBETA

V objekte (materská škola a jasle) sa vykuruje tepelným čerpadlom, ohrev teplej vody je tepelným čerpadlom, varenie jedál v kuchyni a bežná spotreba objektu.

Pokrytie spotreby elektrickej energie fotovoltaikou je vo výške 33%, ostatná spotreba elektrickej energie z distribučnej siete je 67%. Elektrická energia generovaná fotovoltaikou využitá v objekte je 62%. Elektrická energia prebytočná dodaná do distribučnej siete je 38% z vyrobenej energie vo FV.

Z denného grafu je vidieť, že z predchádzajúceho dňa úroveň nabitia batérie bola na 10% = vybitá batéria. Počas dňa sa dostala energia v batérii na úroveň 100% v čase cca 14:00. Ďalšia výroba z FV bola presmerovaná do distribučnej siete. Od 18:30 priama výroba skončila, a odber bol opäť z batérií.

Chotín



- Ročná bilancia po mesiacoch
- Ukážka pracovného dňa 9.apríl 2026 s nameranými parametrami

Obr. 10.3 Objekt CHOTÍN

V objekte (materská škola a jasle) sa vykuruje plynovým kotlom, ohrev teplej vody je elektricky v zásobníku, varenie jedál v kuchyni a bežná spotreba objektu.

Pokrytie spotreby elektrickej energie fotovoltikou je vo výške 56%, ostatná spotreba EE z distribučnej siete je 44%. Elektrická energia generovaná fotovoltikou využitá v objekte je 80%. Elektrická energia prebytočná dodaná do distribučnej siete je 20% z vyrobenej energie vo FV. Využitie FV systému CHOTÍN je priaznivejšie ako predchádzajúci objekt PRIBETA. Z denného grafu je vidieť, že z predchádzajúceho dňa úroveň nabitia batérie bola na 60%. Do rána cca 7:30 úroveň nabitia klesla na cca 15%. Počas dňa sa dostala energia v batérii na úroveň 100% v čase cca 14:30. Ďalšia výroba z FV bola presmerovaná do distribučnej siete. Od 17:00 priama výroba skončila, a odber bol opäť z batérií na úroveň 65% nabitia.

Tabuľka 10.2 Výroba elektrickej energie

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ZHODNOTENIE OPATRENÍ FOTOVOLTIKA + BATERIE	BEZ FV	FV BEZ BATERÍÍ		LEN BATERIE		FV + BATERIE			DO SIETE
	ELEKTRINA	ELEKTRINA	Úspora	ELEKTRINA	Úspora	ELEKTRINA	Úspora		ELEKTRINA
ENERGIA DODANÁ (kWh)	235 099	54 793	23.3%	39 007	16.6%	93 800	39.9%		83 910
FAKTOR PE (-)	2.200	2.200		2.200		2.200			2.200
PRIMÁRNA ENERGIA (kWh)	517 218	120 545	23.3%	85 815	16.6%	206 360	39.9%		184 602
FAKTOR EMISÍÍ CO ₂ (kg/kWh)	0.167	0.167		0.167		0.167			0.167
EMISIE CO ₂ (kg)	39 262	9 150	23.3%	6 514	16.6%	15 665	39.9%		14 013

Komentár k tabuľke č.

Stĺpce:

- č.1 posudzovaná veličina
- č.2 súčet spotrieb elektrickej energie na všetkých objektoch
- č.3 EE vyrobená vo fotovoltaike a využitá v objekte
- č.4 EE vyrobená vo fotovoltaike a využitá v objekte (podiel na celkovej spotrebe)
- č.5 EE vyrobená vo fotovoltaike a využitá v objekte s použitím BATÉRIÍ
- č.6 EE vyrobená vo FV a využitá v objekte s použitím BATÉRIÍ (podiel na celkovej spotrebe)
- č.7 EE vyrobená a využitá spolu (č3 + č5)
- č.8 EE vyrobená a využitá spolu (č3 + č5) (podiel na celkovej spotrebe)
- č.9 -
- č.10 EE vyrobená vo FV prebytočná, dodaná do rozvodnej siete

10.2 Vyhodnotenie budov pre školstvo

- Využitie FV systému je veľmi závislé na správnom návrhu veľkosti panelov, veľkosti batériového úložiska a denného/ročného odberového diagramu.
- Štatisticky z meraných objektov je pokrytie spotreby EE systémom bez batérií na úrovni 23,3%.
- Použitie batérií zvýši pokrytie spotreby EE o 16,6%
- Spoločné využitie FV + BAT zvýši využitie na 39,9% = (23,3% + 16,6%)
- Vyrobená prebytočná energia je dodaná do elektrickej siete.
- Zo štatistických údajov vyplýva že optimalizáciou návrhu veľkosti FV panelov a batérií je možné zvýšiť efektivitu využitia EE z fotovoltaických panelov. Maximálne využitie EE v objektoch bolo namerané na úrovni až 70%.

Údaje boli zistené meraním po dobu 30 mesiacov na 28 objektoch. Vyhodnotenie je uvedené len za rok 2025 u 18-tich objektoch. Merania sa realizujú priebežne v intervale 5 minút.

Úspora primárnej energie je významná, nakoľko faktor primárnej energie pri elektrickej energii je veľmi nepriaznivý, na úrovni 2,2. Primárna energia je prepočítaná z energie spotrebovanej, pomocou faktorov primárnej energie, ktoré definuje vyhláška Ministerstva dopravy a výstavby č. 364/2012 Z.z.

Emisie CO₂ sú prepočítané z energie spotrebovanej, na základe druhu použitej energie a faktorov emisií CO₂ podľa vyhlášky 364/2012 Z.z.

Výpočty primárnej energie a emisií CO₂ sú uvedené v tabuľke ***.

11 Budovy na bývanie - analýza spotreby tepla na vykurovanie a ohrev teplej vody na prevádzku a sledovanie realizovaných opatrení

Na analýzu spotreby tepla na vykurovanie a ohrev teplej vody na prevádzku a sledovanie realizovaných opatrení bol vybraný objekt:

BYTOVÝ DOM ČÍNSKA 25, 27, 29, 31 KOŠICE

- Konštrukčný systém P1.14
- Počet bytových jednotiek = 64
- Počet obytných podlaží = 8



Obr. 11.1 Bytový dom Čínska 25, 27, 29, 31 Košice

11.1 Cieľ analýzy

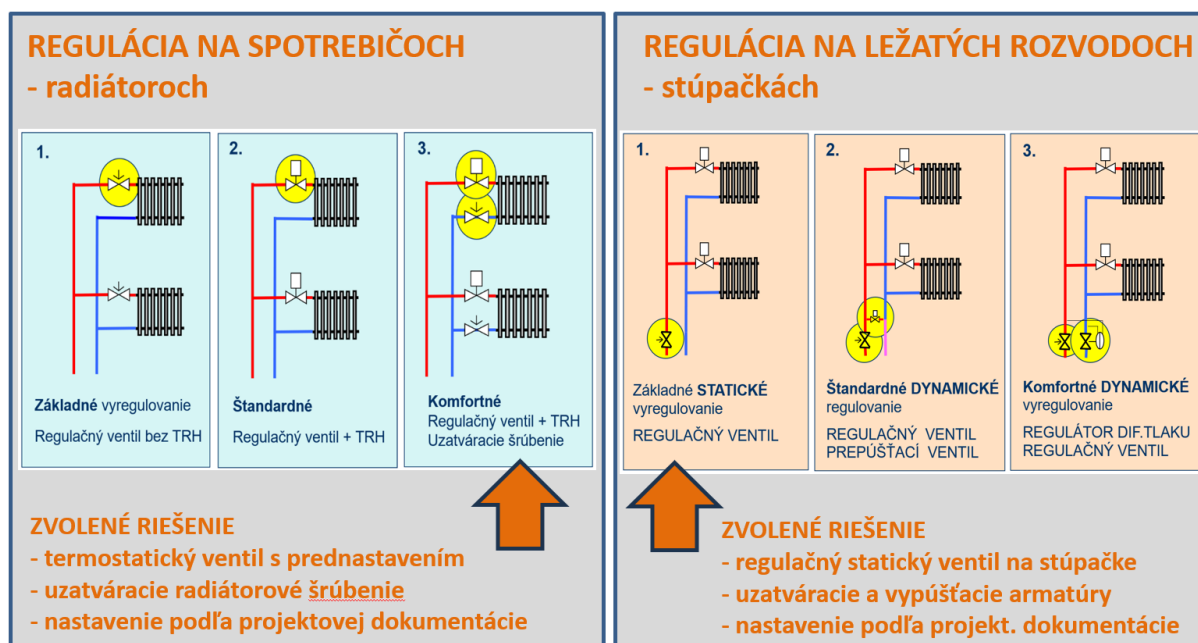
Vybraný bytový dom bol podrobený analýze za účelom:

1. preukázania potenciálu energetických úspor
2. zníženia potreby primárnej energie a emisií

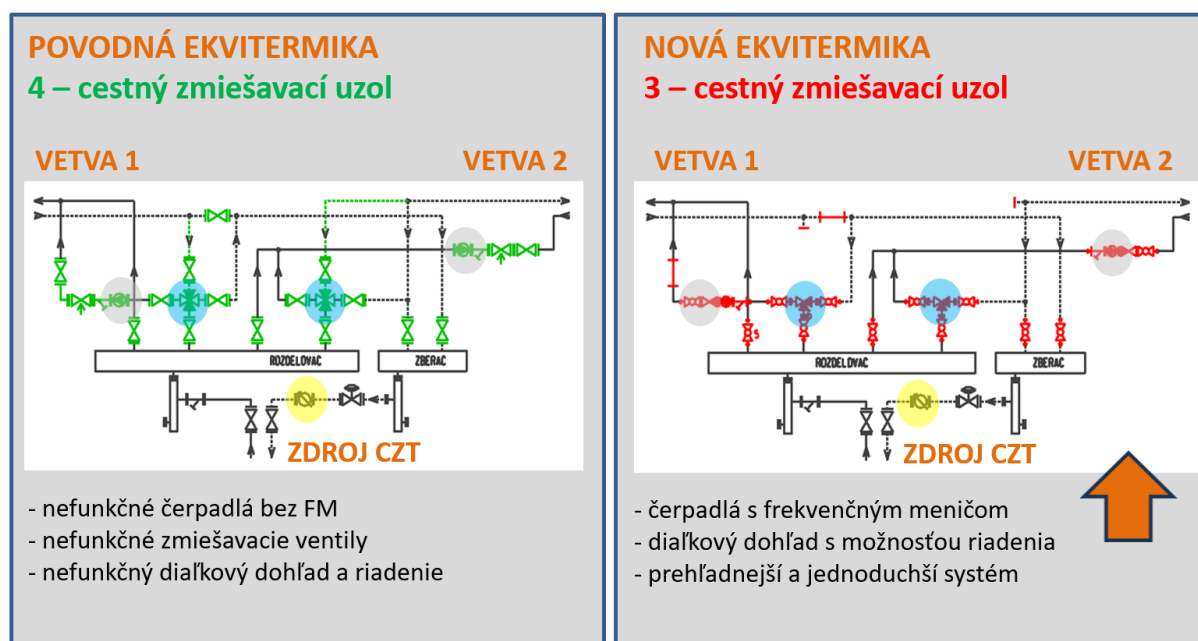
Hlavné oblasti a postupné kroky na dosiahnutie cieľa sú:

1. definovanie parametrov obytného domu pred realizáciou energetických opatrení
2. realizácia opatrení na obálke objektu – zateplenie obvodového plášťa
3. úpravy na systéme vykurovania – dvojjónová ekvitermická regulácia
4. úpravy na systéme dodávky teplej vody – modul na ohrev teplej vody
5. inštalácia OZE – fotovoltika na ohrev TV – ostrovná prevádzka
6. vyhodnotenie opatrení – energetické, ekonomické

11.2 Úpravy na systéme vykurovania



Obr. 11.2 Možnosti na úprave rozvodov vykurovania a realizované riešenie

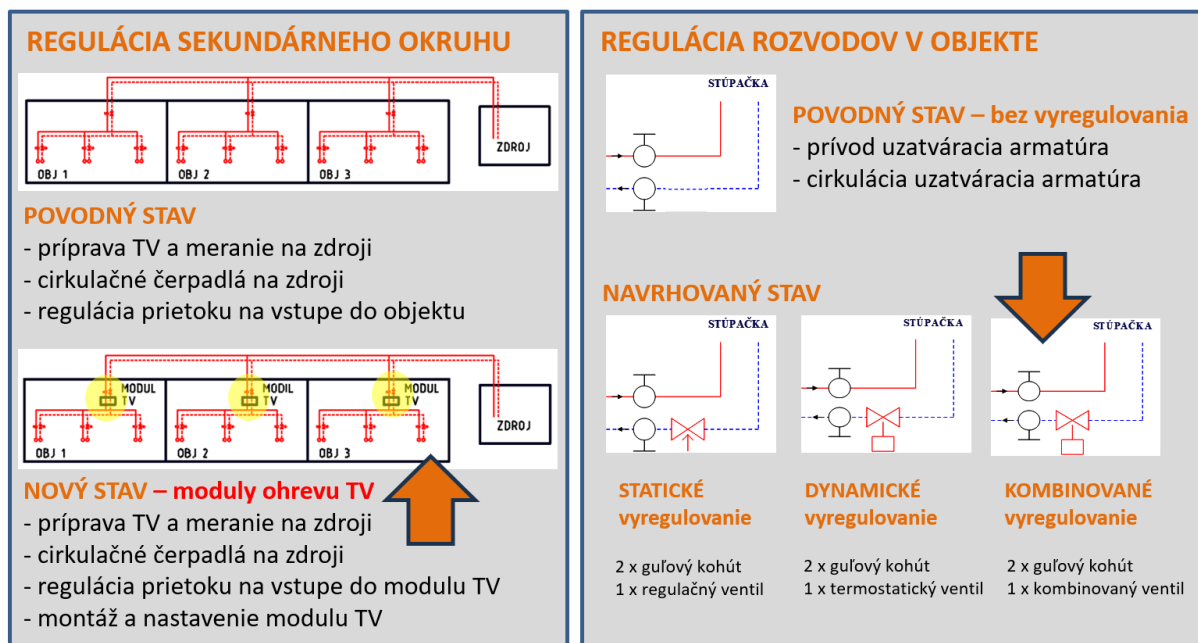


Vetva č.1 = východná fasáda objektu

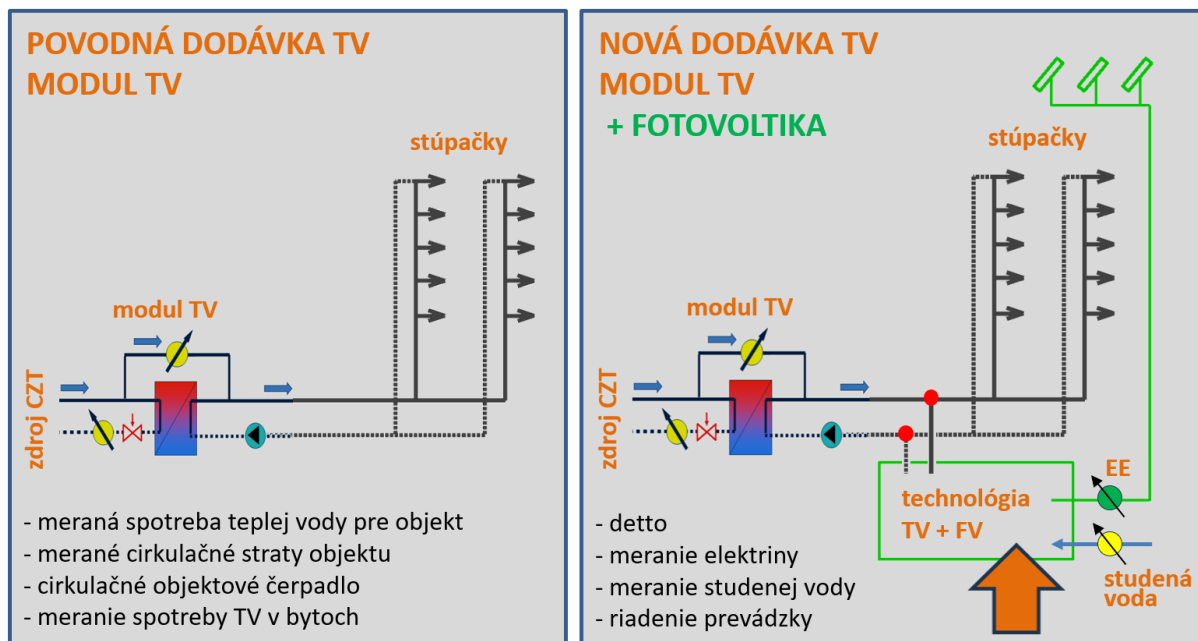
Vetva č.2 = západná fasáda objektu

Obr. 11.3 Rekonštrukcia ekvitermického uzla vykurovania na vstupe do objektu

11.3 Úpravy na systéme ohrevu teplej vody



Obr. 11.4 Rekonštrukcia systému dodávky teplej vody z OST a vyregulovanie cirkulačných rozvodov teplej vody



Obr. 11.5 Inštalácia doplnkového zdroja ohrevu teplej vody pre objekt = fotovoltické panely v ostrovnej prevádzke na ohrev TV v zásobníkoch

1. FOTOVOLTICKÉ PANELY

Strecha objektu 735 m²

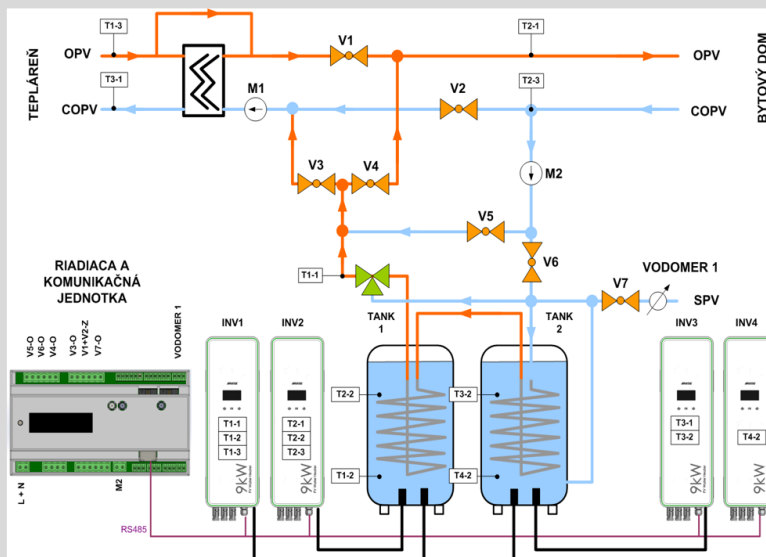
- Prípustná max záťaž = 40 kg/m² podľa statického posudku
- Panely záťaž = 33 kg/m²
- Panely rozložené v 36 radoch po 2 kusoch
- Orientácia JUH
- Sklon 12,5 °
- Počet panelov 72 kusov 505 Wp



Obr. 11.6 Popis a obrázok z montáže fotovoltaických panelov na streche objektu

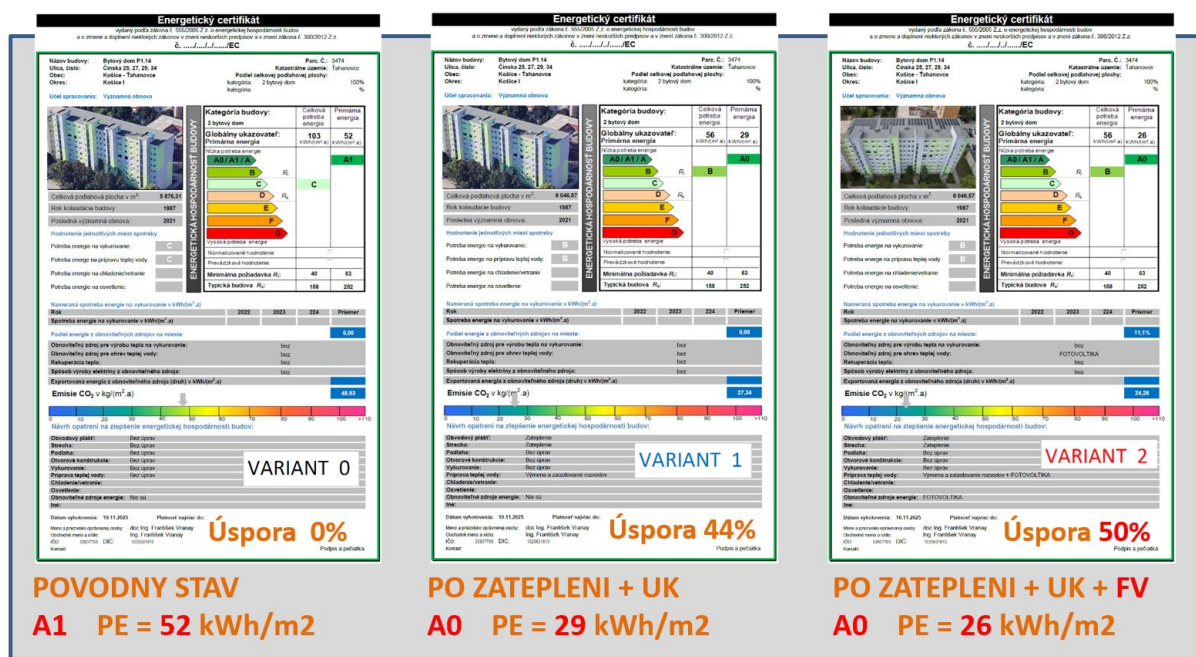
SYSTÉM TVORIA:

- 4ks 9kw meničov pre ohrev vody
- Riadiaca a komunikačná jednotka
- Ventily V1 až V7
- Vodomer studenej vody s impulzným výstupom
- Teplotné snímače vyvedené z meničov
- Obehové čerpadlá M1 a M2



Obr.11.7 Elektrická schéma a schéma riadenia ohrevu a dodávky teplej vody

Čiastkové vyhodnotenie realizovaných opatrení



Obr. 11.8 Energetické certifikáty objektu pred úpravou Variant „0“, Po zateplení a úprave na vykurovaní Variant „1“, Po inštalácii fotovoltických panelov na ohrev teplej vody Variant „2“

Výsledky z realizovaných opatrení je možné definovať:

1. Východzí stav je objekt bez energetických opatrení = Variant „0“ Primárna energia = 52 kWh/m², Energetická trieda A¹. CO₂ = 48,93 kg/m²
2. Po zateplení obalových konštrukcií a úpravách na vykurovaní = Variant „1“. Primárna energia = 29 kWh/m² = úspora 44%, Energetická trieda A⁰. CO₂ = 27,34 kg/m²
3. Po úpravách na príprave teplej vody a rozvodoch teplej vody = Variant „2“, Primárna energia = 26 kWh/m², Úspora voči variantu „0“ = 50%. Energetická trieda A⁰. CO₂ = 24,28 kg/m²

Údaje boli zistené meraním po dobu 24 mesiacov. Vyhodnotenie je uvedené len za rok 2025. Bude doplnené aj o rok 2024. Merania sa realizujú priebežne v intervale 1 hodina.

Úspora primárnej energie a emisií CO₂ je významná na úrovni cca 50%. Primárna energia je prepočítaná z energie spotrebovanej, pomocou faktorov primárnej energie ktoré definuje vyhláška Ministerstva dopravy a výstavby č. 364/2012 Z.z.

Emisie CO₂ sú prepočítané z energie spotrebovanej, na základe druhu použitej energie a faktorov emisií CO₂ podľa vyhlášky 364/2012 Z.z.

Výpočty primárnej energie a emisií CO₂ budú uvedené v ďalšej časti analýzy.

11.4 Vplyv zateplenia na spotrebu tepla v obytných budovách

Predmetom analýzy je hodnotenie vplyvu zateplenia bytových domov na spotrebu tepla na vykurovanie. Posudzované objekty sa nachádzajú v meste Košice, konkrétne na sídliskách Kuzmányho a Ťahanovce. Sledované obdobie zahŕňa roky 1995 až 2025, teda celkovo 31 rokov prevádzky objektov.

Počas sledovaného obdobia boli na objektoch realizované viaceré opatrenia zamerané na zníženie energetickej náročnosti a optimalizáciu prevádzky vykurovacích systémov:

1. hydraulické vyregulovanie vykurovacej sústavy vrátane osadenia termostatických ventilov,

2. montáž pomerových rozdeľovačov nákladov na vykurovacích telesách,
3. zateplenie obvodového plášťa budov,
4. opätovné hydraulické vyregulovanie po realizácii zateplenia za účelom prispôsobenia hydraulických pomerov zmenenej potrebe tepla.

Vplyv realizovaných opatrení

Každé z uvedených opatrení má určitý vplyv na výslednú spotrebu tepla na vykurovanie. Za najvýznamnejšie možno považovať realizáciu zateplenia a montáž pomerových rozdeľovačov nákladov.

Pomerové rozdeľovače nákladov motivujú užívateľov bytov k racionálnemu hospodáreniu s teplom, keďže spotreba je meraná na úrovni jednotlivých vykurovacích telies a následne adresne rozpočítaná medzi vlastníkov bytov. Vlastníci tak získavajú možnosť priamo ovplyvňovať svoje náklady reguláciou vnútornej teploty.

Hydraulické vyregulovanie samo o sebe neznižuje významne spotrebu tepla, ale zabezpečuje správnu funkciu vykurovacej sústavy a umožňuje efektívne využitie regulačných prvkov. Bez merania a individuálneho rozpočítania nákladov býva dosahované zníženie spotreby po zateplení často nižšie, ako predpokladajú teoretické výpočty.

Ďalším významným faktorom je spôsob rozpočítania nákladov na vykurovanie. Spotreba tepla sa rozdeľuje na fixnú a variabilnú zložku, pričom ich vzájomný pomer určujú vlastníci bytov. Počas sledovaného obdobia sa tieto pomery viackrát menili a medzi jednotlivými objektmi sa mohli výrazne odlišovať. Tieto zmeny majú priamy vplyv na motiváciu užívateľov šetriť teplom a môžu spôsobovať zdanlivo nelogické zmeny spotreby v jednotlivých rokoch.

Z dôvodu eliminácie krátkodobých vplyvov jednotlivých opatrení a prevádzkových zmien je hodnotenie vykonané za obdobie 31 rokov, ktoré predstavuje dostatočne rozsiahlu štatistickú vzorku na posúdenie dlhodobého vplyvu zateplenia.

Spotreba tepla bola meraná fakturačnými kalorimetrickými meračmi tepla podliehajúcimi pravidelnému overovaniu (ciachovaniu), čo zabezpečuje vysokú presnosť získaných údajov.

Rozdelenie hodnotených objektov

Do analýzy bolo zaradených celkovo 70 bytových domov. Objekty boli rozdelené podľa príslušnosti k okruhom odovzdávacích staníc tepla (OST) a následne podľa nasledujúcich kritérií:

Podľa konštrukčného systému:

- T06B
- T08B
- P1.14
- P1.15
- ostatné konštrukčné systémy

Podľa tvarového riešenia:

- vežové objekty,
- radové objekty.

Podľa stavu zateplenia:

- zateplené objekty,
- nezateplené objekty (referenčná skupina).

Podľa kvality zateplenia:

- hrúbka tepelnej izolácie,
- rozsah realizovaných opatrení.

Podľa zdroja tepla:

- centralizované zásobovanie teplom (CZT) – dodávka tepla z TEHO Košice,
- plynové kotolne (PK) prevádzkované spoločnosťou TEHO.

Hodnotený ukazovateľ:

Pre jednotlivé objekty boli vyhodnotené nasledujúce parametre pred a po realizácii zateplenia:

a) Energetické ukazovatele

- priemerná ročná spotreba tepla na vykurovanie (kWh/rok),

- merná spotreba tepla na vykurovanie vzťahovaná na vykurovanú plochu (kWh/m²·rok),
 - absolútna úspora tepla (kWh/rok),
 - relatívna úspora tepla (%).
- b) Environmentálne ukazovatele
- potreba primárnej energie podľa použitého zdroja tepla (kWh/m²·rok),
 - produkcia emisií CO₂ (kg CO₂/m²·rok),
 - zníženie emisií CO₂ po realizácii zateplenia (%).
- c) Porovnávacie ukazovatele
- porovnanie zateplených a nezateplených objektov,
 - porovnanie jednotlivých konštrukčných systémov,
 - porovnanie vežových a radových objektov,
 - porovnanie objektov napojených na CZT a plynové kotolne.

Cieľ analýzy

Cieľom analýzy je na základe dlhodobých prevádzkových údajov kvantifikovať reálny vplyv zateplenia bytových domov na spotrebu tepla, potrebu primárnej energie a produkciu emisií CO₂, pričom sa súčasne hodnotí vplyv konštrukčného systému budovy, typu zdroja tepla a správania užívateľov na dosahované energetické úspory.

*Tab. 11.1** Zoznam objektov a údaje o spotrebe tepla na vykurovanie (1995-2025)*

	1995		1996		1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024		2025																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spotreba	Spot

		1995		1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025				
	Odborné miesto	Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba		Spotreba					
		za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)	za rok	(kWh)				
OST 1223																																					
27	L Novomeského 1	673 400	722 100	635 800	573 200	543 700	545 500	584 219	580 992	557 800	546 239	484 181	474 683	414 876	458 611	341 472	338 778	316 444	310 550	318 110	270 330	263 360	268 290	298 130	298 130	278 130	261 670	273 360	309 720	276 600	264 660	257 440	286 810				
28	L Novomeského 3	665 244	632 718	633 000	582 800	538 200	530 900	545 800	574 500	556 300	535 300	466 900	475 800	411 500	323 478	233 140	393 138	296 611	294 261	281 892	240 000	275 200	284 800	265 644	278 278	260 417	269 467	293 361	259 500	239 556	235 250	263 306					
29	L Novomeského 5	662 400	692 200	639 800	569 900	547 000	560 500	560 500	574 300	564 200	565 200	518 300	499 300	434 000	402 700	330 000	443 400	335 300	328 800	316 300	263 200	302 800	310 500	300 094	270 399	269 399	271 063	293 139	269 278	260 694	237 944	273 750					
30	Magurská 11, 13, 15	558 800	571 800	497 000	468 700	389 000	379 500	379 500	390 300	370 000	351 900	309 700	284 700	260 700	168 800	178 500	187 300	167 700	169 800	165 500	129 500	148 900	162 680	160 956	145 444	127 806	133 063	153 361	138 833	124 083	116 778	138 167					
31	Magurská 5, 7, 9	532 400	527 200	452 300	445 000	388 500	368 500	368 500	355 500	329 536	298 500	222 428	180 300	151 419	146 481	193 608	235 200	207 600	205 260	165 300	165 300	199 400	205 350	199 400	164 888	174 917	163 139	197 833	176 194	167 944	147 167	171 417					
OST 1225																																					
32	ČSA 6,8,10		671 144	802 500	719 444	616 637	577 477	754 358	762 983	751 972	698 972	689 278	588 089	479 639	510 203	536 567	579 611	556 667	546 083	550 556	439 058	492 794	498 600	485 600	485 600	485 600	485 600	459 600	463 300	425 300	303 000	366 877	453 806				
OST 1226																																					
33	Kol Nálepku 1, 3, 5	421 500	485 633	428 711	351 919	343 828	334 000	339 000	339 000	317 800	283 481	270 892	248 688	214 600	200 200	202 572	215 692	203 622	203 980	204 230	161 460	183 228	193 250	192 917	183 806	172 639	186 472	201 583	178 139	160 667	153 444	173 417					
34	Kol Nálepku 7, 9, 11	400 969	447 718	413 900	388 800	360 558	336 500	319 200	340 700	325 992	298 600	269 900	277 100	235 100	224 300	225 400	225 400	200 600	204 400	210 900	172 800	202 556	202 889	217 000	195 694	176 778	186 222	207 583	167 167	169 528	168 250	167 694					
35	Kol Nálepku 13, 15, 17	422 600	482 800	442 000	384 469	331 050	336 800	323 450	326 700	317 500	291 000	281 200	265 400	224 700	220 500	223 100	242 700	224 831	222 656	221 300	173 900	199 456	205 389	205 278	198 111	184 639	198 056	224 389	205 361	178 444	171 222	196 528					
36	Kuzmáňovo 21, 23, 25, 27	792 578	940 800	875 000	783 400	745 100	669 200	887 800	720 400	707 400	650 400	622 300	591 000	510 200	536 400	531 600	579 600	534 500	482 300	350 244	293 900	331 866	350 778	354 750	327 389	303 750	316 556	344 083	311 444	279 066	274 111	303 278					
37	Magurská 2	594 000	682 700	479 397	599 525	567 100	533 233	555 444	543 861	530 194	503 361	500 917	468 886	395 344	352 800	330 300	331 800	311 800	316 000	294 900	241 900	272 211	291 972	293 500	271 056	258 694	269 500	294 139	267 684	238 972	231 389	260 028					
OST 1701																																					
38	Hutnická 2, 4, 6	307 611	366 000	319 000	238 300	262 600	253 400	260 700	252 161	266 889	244 083	236 684	225 306	164 639	161 833	159 361	178 639	166 556	162 222	164 389	141 667	164 556	172 639	174 889	158 472	147 556	153 684	168 417	153 472	135 500	128 933	148 984					
39	Hutnická 8, 10, 12, 14, 16, 18	611 063	744 372	665 200	522 361	567 306	519 900	822 158	543 261	576 944	562 192	536 194	506 536	401 250	385 278	383 278	411 861	376 056	343 944	326 222	263 684	307 917	342 167	344 417	322 333	315 399	338 667	369 528	324 806	264 333	264 139	306 139					
OST 2224																																					
40	Pekinská 10, 12	309 464	445 117	369 883	287 133	282 000	281 900	290 200	265 500	268 500	232 900	200 800	219 000	166 536	183 900	185 200	209 900	185 700	178 800	170 500	141 429	44 333	125 278	130 389	130 389	123 694	114 306	123 694	126 472	112 306	105 056	98 972	105 028				
41	Pekinská 14	219 989	304 886	282 472	198 463	191 669	184 531	194 060	180 050	186 392	168 856	150 992	138 042	122 078	121 469	116 434	121 342	112 167	110 306	100 000	75 833	66 111	73 444	78 667	69 889	63 222	64 639	77 667	75 684	64 778	59 389	66 139					
42	Pekinská 16, 18	321 369	377 722	360 993	298 669	280 700	236 700	271 300	274 000	281 200	255 400	246 500	231 200	193 100	184 300	189 400	207 300	185 500	129 400	130 900	99 384	110 028	118 972	123 972	123 972	117 083	109 139	117 111	120 722	109 066	98 983	93 444	110 833				
OST 2225																																					
43	Bukurešťská 29	272 384	302 611	287 222	226 533	224 231	211 192	215 597	208 217	206 919	187 961	182 769	166 990	139 172	132 539	138 242	152 533	139 294	136 080	121 110	72 966	83 750	90 028	83 139	72 861	66 722	72 528	78 472	71 417	61 333	58 806	69 361					
44	Bukurešťská 32	243 792	291 722	280 139	216 600	191 711	174 850	192 150	186 422	182 331	172 533	171 153	154 572	126 619	118 975	118 220	126 572	123 388	126 850	127 300	98 182	110 222	115 417	104 083	66 306	59 278	54 139	54 139	54 139	54 139	58 056						
45	Bukurešťská 30, 31	279 656	361 944	356 167	268 039	253 900	255 500	281 200	256 300	240 300	215 900	215 800	197 800	167 600	159 400	164 400	176 900	161 700	162 700	159 000	130 300	152 056	161 444	168 500	162 944	144 250	152 639	169 972	146 472	139 844	123 900	124 917					
46	Havanská 10, 11, 12	577 036	613 303	592 389	476 167	448 000	460 600	516 000	520 200	538 600	491 800	473 100	428 100	382 200	348 300	346 600	388 000	343 800	327 000	310 400	239 789	267 556	282 444	298 389	270 583	259 611	271 722	291 528	260 566	235 633	220 066	247 306					
47	Havanská 13	267 953	330 333	311 917	217 244	213 242	192 819	217 867	207 497	211 519	188 300	182 111	170 239	138 211	128 500	135 188	152 311	137 300	133 950	107 312	117 694	127 944	133 389	127 944	101 306	81 056	81 833	68 167	61 444	63 222	72 000						
48	Havanská 14, 15	260 018	344 656	342 194	281 789	270 900	260 000	299 400	289 900	291 400	263 700	259 600	240 900	210 000	209 600	219 500	251 900	237 000	232 000	221 300	166 728	175 611	184 667	191 444	174 917	165 417	174 167	185 500	162 139	149 972	144 656	162 194					
49	Havanská 7, 8, 9	429 764	567 833	566 361	459 006	470 600	465 300	473 200	476 700	476 700	452 800	433 000	399 911	330 600	319 500	328 500	370 400	329 000	310 100	288 400	225 360	248 472	271 083	277 528	275 750	235 306	240 633	259 389	270 566	201 500	193 811	217 898					

Tab. 11.3** Zoznam objektov a údaje o spotrebe tepla na vykurovanie (1995-2025)

[illegible]

*Tab. 11.4** Zoznam objektov – rozdelenie do kategórií a prehľad úspor (1995-2025)*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
	Odborné miesto	VEŽIAK	RADŮKA	KONŠTR. SYSTÉM				Vykurovaná plocha (m²)	ZATEP LENIE	PRED zateplením		PO zateplení					
				T06B	T08B	P1.14 P1.15	INE			spotreba UK		spotreba UK		ÚSPORA			
										ROK	(kWh)	(kWh/m²)	(kWh)	(kWh/m²)	(%)	(kWh)	(kWh/m²)
OST 1009																	
1	Florianská 4, 6		1		1			2 791.77	2006		317 913	113.9	146 823	52.6	53.8%	171 090	61.3
OST 1101																	
2	Watsonová 53	1			1			2 303.20	2011		269 475	117.0	118 250	51.3	56.1%	151 225	65.7
3	Watsonová 57	1			1			2 323.90	2008		307 848	132.5	139 148	59.9	54.8%	168 700	72.6
OST 1104																	
4	Tatranská 1 - 3	1		1				5 949.22	2007		780 161	131.1	418 279	70.3	46.4%	361 881	60.8
OST 1105																	
5	Branisková 1, 3	1		1				5 949.22	2010		751 321	126.3	388 352	65.3	48.3%	362 969	61.0
6	Branisková 5, 7	1		1				5 981.22	2012		672 138	112.4	352 718	59.0	47.5%	319 420	53.4
7	Branisková 9, 11	1		1				5 877.60	2004		852 520	145.0	413 271	70.3	51.5%	439 249	74.7
8	Branisková 2, 4, 6	1		1		1		1 353.33	2007		362 132	89.3	181 335	44.7	49.9%	180 798	44.6
9	Branisková 8, 10, 12	1		1		1		1 350.61	2007		325 626	83.1	160 497	41.0	50.7%	165 130	42.2
10	Branisková 14, 16, 18	1		1		1		1 350.61	2007		350 711	86.6	192 608	47.5	45.1%	158 102	39.0
11	Branisková 20, 22, 24	1		1		1		1 350.61	2007		348 729	86.0	190 963	47.1	45.2%	157 765	38.9
12	Tatranská 2, 4	1		1		1		5 844.74	2007		753 257	128.9	401 715	68.7	46.7%	351 542	60.1
13	Tatranská 6, 8	1		1		1		5 844.74	2011		703 260	120.3	367 500	62.9	47.7%	335 760	57.4
OST 1209																	
14	Kuzmányho 35, 37, 39, 41		1		1			1 558.09	2006		680 225	124.7	286 414	52.5	57.9%	393 811	72.2
15	Škultétyho 2	1		1				4 624.58	2000		584 247	126.3	325 785	70.4	44.2%	258 462	55.9
16	Vojenská 1,2,3		1		1			4 142.75	2003		464 384	112.1	222 290	53.7	52.1%	242 094	58.4
17	Vojenská 4,5,6		1		1			4 109.34	2004		466 340	113.5	229 285	55.8	50.8%	237 054	57.7
18	Vojenská 7,8,9		1		1			4 092.43	2008		406 120	99.2	207 499	50.7	48.9%	198 621	48.5
19	Vojenská 10,11,12		1		1			4 092.43	2006		397 928	97.2	250 829	61.3	37.0%	147 099	35.9
OST 1221																	
20	Dargovská 1	1		1				4 651.88	2006		587 876	126.4	283 898	61.0	51.7%	303 979	65.3
21	Kuzmányho 31, 33	1		1				5 949.22	2005		820 134	137.9	402 340	67.6	50.9%	417 794	70.2
22	Magurská 1, 3	1		1				5 961.82	2006		824 045	138.2	460 778	77.3	44.1%	363 267	60.9
OST 1222																	
23	Karpatská 1	1		1				4 651.88	2010		554 144	119.1	267 067	57.4	51.8%	287 078	61.7
24	Karpatská 2	1		1				4 676.44	2007		541 015	115.7	295 738	63.2	45.3%	245 277	52.4
25	Karpatská 3	1		1				4 651.88	2007		590 579	127.0	278 538	59.9	52.8%	312 041	67.1
26	Dargovská 2	1		1				4 676.88	2006		577 440	123.5	273 303	58.4	52.7%	304 138	65.0
OST 1223																	
27	L. Novomestského 1	1		1				4 667.60	2009		557 507	119.4	289 888	62.1	48.0%	267 620	57.3
28	L. Novomestského 3	1		1				4 676.44	2009		539 493	115.4	273 224	58.4	49.4%	266 269	56.9
29	L. Novomestského 5	1		1				4 676.44	2010		549 133	117.4	287 394	61.5	47.7%	261 739	56.0
30	Magurská 11, 13, 15		1		1			1 350.61	2007		407 100	100.4	150 733	37.2	63.0%	256 367	63.2
31	Magurská 5, 7, 9		1		1			1 353.33	2007		413 048	101.4	185 774	45.6	55.0%	227 274	55.8
OST 1225																	
32	ČSA 6,8,10		1				1	4 780.76	2006		702 477	146.9	483 647	101.2	31.2%	218 829	45.8
OST 1226																	
33	Kpt.Nálepku 1, 3, 5		1		1			1 353.33	2006		355 967	86.7	188 748	46.0	47.0%	167 218	40.7
34	Kpt.Nálepku 7, 9, 11		1		1			1 415.89	2006		356 720	84.3	200 166	47.3	43.9%	156 553	37.0
35	Kpt.Nálepku 13, 15, 17		1		1			1 415.89	2006		357 215	84.0	206 293	48.5	42.2%	150 923	35.5
36	Kuzmányho 21, 23, 25, 27		1		1			2 429.36	2007		744 943	153.3	382 187	78.7	48.7%	362 757	74.7
37	Magurská 2	1		1				4 651.88	2007		543 212	116.8	282 236	60.7	48.0%	260 975	56.1
OST 1701																	
38	Hutnická 2, 4, 6		1				1	658.42	2006		273 494	126.5	158 251	73.2	42.1%	115 243	53.3
39	Hutnická 8,10,12,14,16,18		1				1	658.42	2006		578 816	140.3	336 969	81.7	41.8%	241 846	58.6
OST 2224																	
40	Pekinská 10, 12		1				1	2 637.44	2014		251 786	95.5	119 048	45.1	52.7%	132 738	50.3
41	Pekinská 14		1				1	1 776.40	2013		171 929	96.8	69 623	39.2	59.5%	102 307	57.6
42	Pekinská 16, 18		1				1	2 642.08	2011		259 403	98.2	113 474	42.9	56.3%	145 929	55.2
OST 2225																	
43	Bukurešťská 29		1				1	2 058.64	2013		196 252	95.3	73 532	35.7	62.5%	122 720	59.6
44	Bukurešťská 32		1				1	1 799.62	2014		177 667	98.7	75 224	41.8	57.7%	102 443	56.9
45	Bukurešťská 30,31		1				1	2 188.96	2023		204 014	93.2	124 208	56.7	39.1%	79 805	36.5
46	Havanská 10,11,12		1				1	3 825.12	0		378 541	99.0	378 541	99.0	0.0%	-	-
47	Havanská 13		1				1	1 986.48	2018		180 410	90.8	75 575	38.0	58.1%	104 834	52.8
48	Havanská 14,15		1				1	2 188.96	0		226 486	103.5	226 486	103.5	0.0%	-	-
49	Havanská 7,8,9		1				1	3 825.12	0		347 643	90.9	347 643	90.9	0.0%	-	-
OST 2231																	
50	Atenská 5 - 11		1				1	9 052.09	0		682 285	75.4	682 285	75.4	0.0%	-	-
51	Bruselská 8,9,10		1				1	3 302.40	0		264 548	80.1	264 548	80.1	0.0%	-	-
OST 2232																	
52	Atenská 12 - 19		1				1	10 690.85	0		684 333	64.0	684 333	64.0	0.0%	-	-
53	Atenská 20 - 25		1				1	7 819.64	0		666 474	85.2	666 474	85.2	0.0%	-	-
OST 2233																	
54	Helsinská 2 - 8		1				1	5 248.57	0		424 782	80.9	424 782	80.9	0.0%	-	-
55	Helsinská 10 - 14		1				1	3 831.36	0		270 411	70.6	270 411	70.6	0.0%	-	-
56	Helsinská 16 - 24		1				1	6 067.37	0		494 125	81.4	494 125	81.4	0.0%	-	-
57	Helsinská 1 - 7		1				1	6 547.07	0		305 697	46.7	305 697	46.7	0.0%	-	-
58	Helsinská 9 - 13		1				1	3 814.39	0		161 930	42.5	161 930	42.5	0.0%	-	-
59	Helsinská 15 - 21		1				1	5 940.46	0		285 021	48.0	285 021	48.0	0.0%	-	-
OST 2234																	
60	Madridská 1	1					1	3 675.35	2014		359 148	97.7	179 159	48.7	50.1%	179 989	49.0
61	Madridská 2	1					1	3 623.28	2011		392 485	108.3	193 936	53.5	50.6%	198 649	54.8
62	Madridská 3	1					1	3 623.28	2007		410 557	113.3	219 089	60.5	46.6%	191 468	52.8
63	Viedenská 2 - 14		1				1	8 259.37	0		667 625	80.8	667 625	80.8	0.0%	-	-
64	Viedenská 16 - 28		1				1	7 540.16	0		625 636	83.0	625 636	83.0	0.0%	-	-
65	Viedenská 30 - 38		1				1	6 005.71	0		491 879	81.9	491 879	81.9	0.0%	-	-
66	Viedenská 1 - 11		1				1	8 425.69	0		668 500	79.3	668 500	79.3	0.0%	-	-
67	Viedenská 13 - 17		1				1	3 829.68	0		321 457	83.9	321 457	83.9	0.0%	-	-
68	Viedenská 19 - 31		1				1	9 532.36	0		760 377	79.8	760 377	79.8	0.0%	-	-
Plynová kotolňa P1+P2																	
69	Gerlachovská 3, 5, 7		1				1	1 876.65	2012		255 910	136.4	129 339	68.9	49.5%	126 571	67.4
Plynová kotolňa P4																	
70	CPH 30	1					1	922.50	2010		126 783	137.4	53 850	58.4	57.5%	72 933	79.1
VÝSLEDNÉ HODNOTY (MWh)																	
								321 802 m²		32 383		20 834			11 548		

- č.1 poradové číslo objektu
- č.2 miesto posudzovaného objektu
- č.3 prevedenie objektu VEŽOVÝ DOM
- č.4 prevedenie objektu RADOVÝ DOM
- č.5 konštrukčný systém objektu T06B
- č.6 konštrukčný systém objektu T08B
- č.7 konštrukčný systém objektu P1.14 a P1.15
- č.8 konštrukčný systém objektu INÉ
- č.9 vykurovaná plocha objektu
- č.10 rok realizácie zateplenia
- č.11 priemerná spotreba tepla na vykurovanie za rok PRED ZATEPLENÍM (kWh/rok)
- č.12 priemerná spotreba tepla na vykurovanie za rok PRED ZATEPLENÍM (kWh/(m².rok))
- č.13 priemerná spotreba tepla na vykurovanie za rok PO ZATEPLENÍ (kWh/rok)
- č.14 priemerná spotreba tepla na vykurovanie za rok PO ZATEPLENÍ (kWh/(m².rok))
- č.15 priemerná úspora spotreby tepla PO ZATEPLENÍ (%)
- č.16 priemerná úspora spotreby tepla PO ZATEPLENÍ (kWh/rok)
- č.17 priemerná úspora spotreby tepla PO ZATEPLENÍ (kWh/(m².rok))

Spôsob zateplenia je závislý od roku zateplenia a v tom čase platných teplotných noriem.

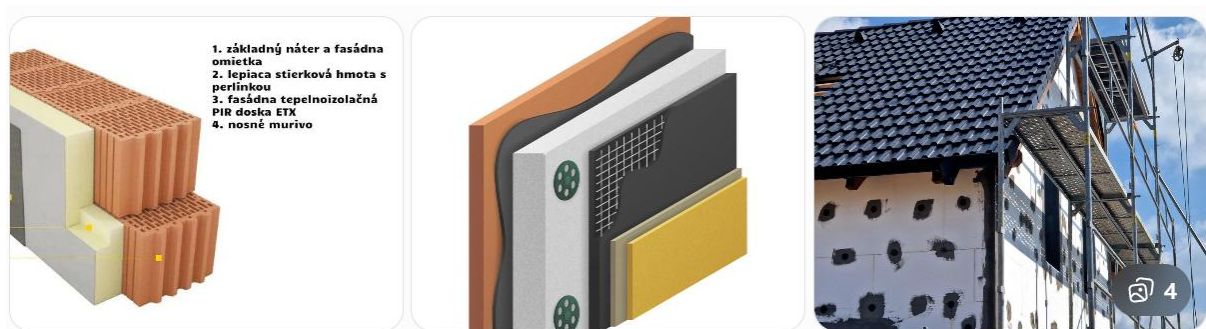
Tab. 11.5** Prehľad ETICS po rokoch ako boli realizované objekty

Obdobie	Pôvodná typová výstavba	< 2010	2010-2013	po 01.01.2013	po 01.01.2021
Tepelný odpor R [(m ² .K)/W]	0,75	1,56	2,00	3,31	5,26
Normová požiadavka R [(m ² .K)/W]	R >				4,40 (2,00)
Dodaná energia [kWh/(m ² .a)]	90,4	71,5	60,1	52,9	49,6
Výpočtová úspora energie		20,90%	33,60%	41,40%	45,20%

Farebne označené obdobie zodpovedá aj tabuľke Zoznam objektov.

Vonkajší zateplňovací systém ETICS je skratka z anglického názvu External Thermal Insulation Composite System. ETICS sa skladá z niekoľkých vrstiev:

1. **Nosná stena**
panel, tehla, pórobetón a pod.
2. **Lepiaci hmota**
zabezpečuje prilepenie izolácie k podkladu
3. **Tepelná izolácia**
najčastejšie:
 1. Expandovaný polystyrén EPS
 2. Minerálna vlna MW
4. **Mechanické kotvenie**
tanierové hmoždinky
5. **Výstužná vrstva**
lepiaca stierka + sklotextilná sieťka.
6. **Penetrácia**
7. **Finálna omietka**
silikónová, silikátová, akrylátová alebo minerálna.



Obr. 11.9** Skladba systému ETICS

Tab. 11.6** Energetické vyhodnotenie a porovnanie podľa zateplenia a zdroja tepla

POSUDZOVANÉ OBJEKTY	POČET	PLOCHA	PODIEL	SPOTREBA NA UK (MWh)		
	(ks)	(m2)	(%)	PRED	PO	ÚSPORA
CELKOM	70	321 802		32 383	20 834	11 548
NEZATEPLENE	19	152 792		8 728	8 728	0
ZATEPLENÉ	51	169 009	100%	23 655	12 107	11 548
ZATEPLENÉ CZT	49	166 210	98.3%	23 272	11 924	11 349
ZATEPLENÉ PLYN	2	2 799	1.7%	383	183	200

Tab. 11.7** Energetické vyhodnotenie a porovnanie podľa zateplenia a konštrukčných systémov

PREHĽAD ÚSPOR ENERGIE NA VYKUROVANIE PO ZATEPLENÍ ROKY 1995 - 2025

ZATEPLENIE	< 2010	2010 - 2013	2013 - 2021	2021 <	< 2010	2010 - 2013	2013 - 2021	2021 <	ÚSPORA
OBJEKTY	RADOVÝ				VEŽOVÝ				(%)
T06B	48.7%				48.6%	48.6%			48.6%
T08B	49.5%				54.8%	56.1%			53.5%
P1.14,15		59.4%	56.2%	39.1%	46.6%	50.6%	50.1%		50.3%
INE	38.4%	49.5%				57.5%			48.4%
ÚSPORA	45.5%	54.4%	56.2%	39.1%	50.0%	53.2%	50.1%		49.8%

Úspory tepla po zateplení do roku 2010 RADOVÉ objekty 45,5% VEŽOVÉ domy 50,0%

Úspory tepla po zateplení do roku 2013 RADOVÉ objekty 54,4% VEŽOVÉ domy 53,2%

Úspory tepla po zateplení do roku 2021 RADOVÉ objekty 56,2% VEŽOVÉ domy 50,1%

Úspory tepla po zateplení po roku 2021 pre malú referenčnú vzorku nie sú hodnotené

CELKOVÉ ÚSPORY TEPLA PO ZATEPLENÍ PRE VŠETKY KATEGÓRIE SÚ 49,8 %.

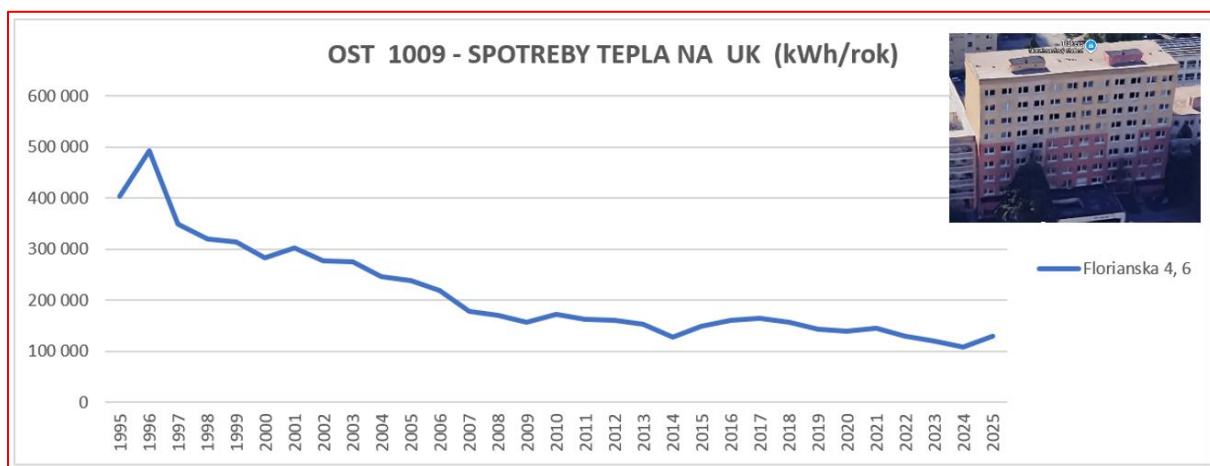
Tab. 11.8** Faktory primárnej energie a emisií CO₂ a podiel na ÚK

2026	MHTH KE	TEHO CZT	TEHO PK	ELEKTR.
FAKTOR PE	0.143	0.460	0.630	2.200

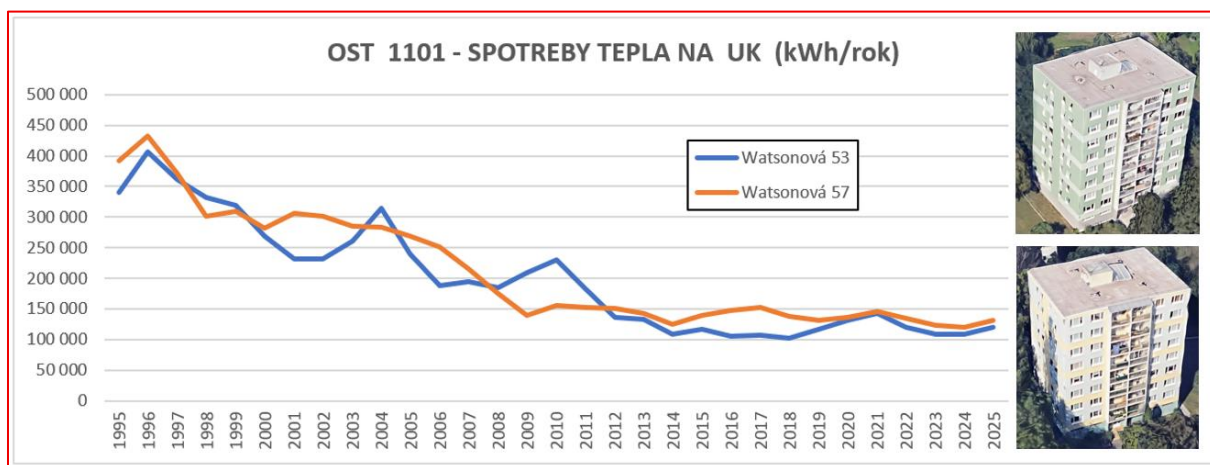
FAKTOR EMISIÍ	0.228	0.228	0.277	0.167
PODIEL NA ÚK	0.0%	98.3%	1.7%	0.0%

Tab. 11.9** Výsledné zhodnotenie opatrení (energetické a environmentálne)

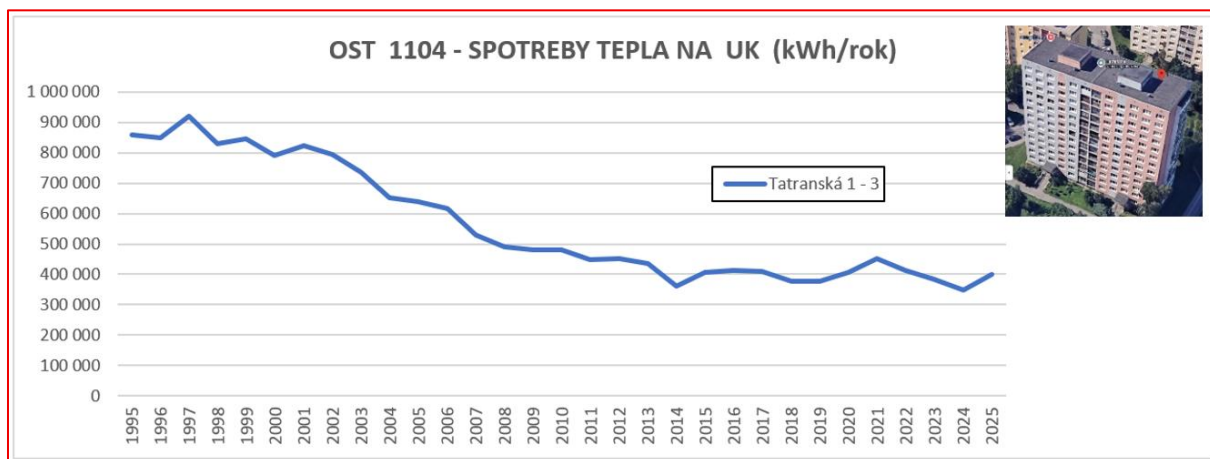
ZHODNOTENIE OPATRENÍ PRE ZATEPLENÉ OBJEKTY	PRED ZATEPLENÍM			PO ZATEPLENÍ			ÚSPORA			
	CZT	PLYN	SPOLU	CZT	PLYN	SPOLU	CZT	PLYN	SPOLU	%
VYKUROVANÁ PLOCHA (m ²)	166 210	2 799	169 009	166 210	2 799	169 009	166 210	2 799	169 009	
ENERGIA DODANÁ (MWh)	23 272	383	23 655	11 924	183	12 107	11 349	200	11 548	48.8%
ENERGIA DODANÁ (kWh/(m ² .a))	140.02	136.72	139.96	71.74	65.44	71.63	68.28	71.27	68.33	48.8%
FAKTOR PE (-)	0.460	0.630		0.460	0.630		0.460	0.630		
PRIMÁRNA ENERGIA (MWh)	10 705	241	10 946	5 485	115	5 600	5 220	126	5 346	48.8%
PRIMÁRNA ENERGIA (kWh/(m ² .a))	64.4	86.1	64.8	33.0	41.2	33.1	31.4	44.9	31.6	48.8%
FAKTOR EMISIÍ CO ₂ (kg/kWh)	0.228	0.277		0.228	0.277		0.228	0.277		
EMISIE CO ₂ (tona)	5 306	106	5 412	2 719	51	2 769	2 588	55	2 643	48.8%
EMISIE CO ₂ (kg/m ² .a)	31.9	37.9	32.0	16.4	18.1	16.4	15.6	19.7	15.6	48.8%



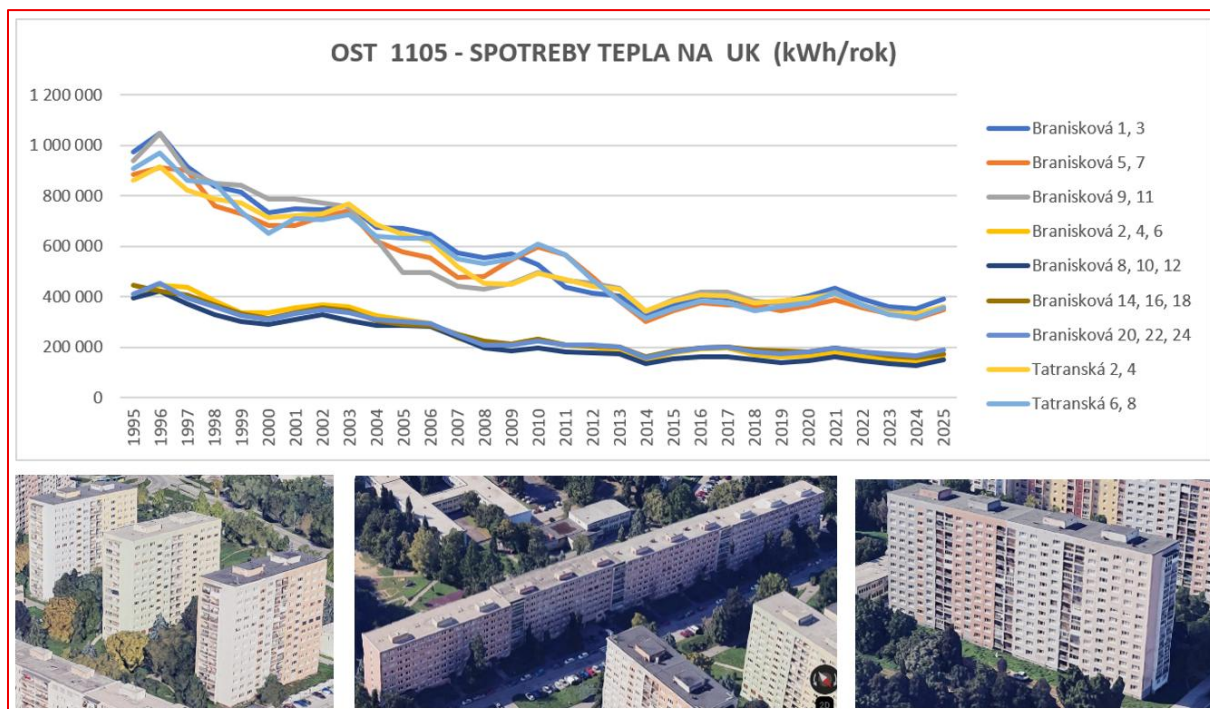
Obr. 11.10** OST 1009 - (Floriánska 4, 6)



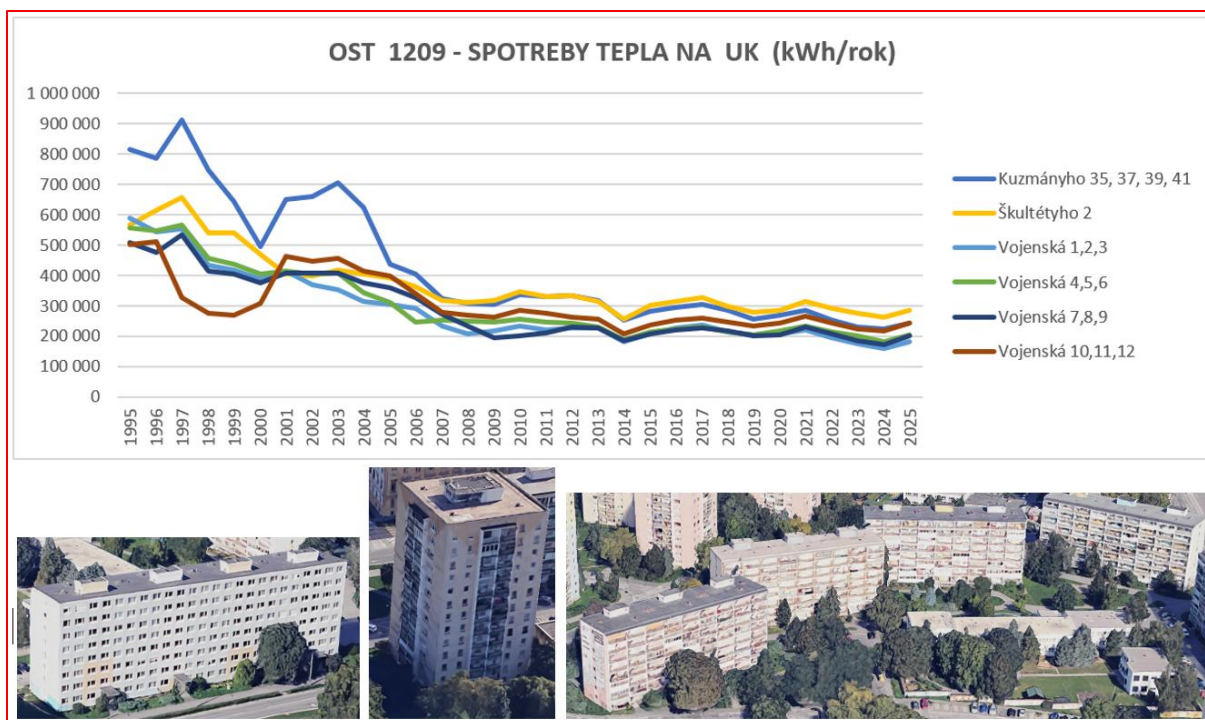
Obr. 11.11** OST 1101 - (Watsonova 53; Watsonova 57)



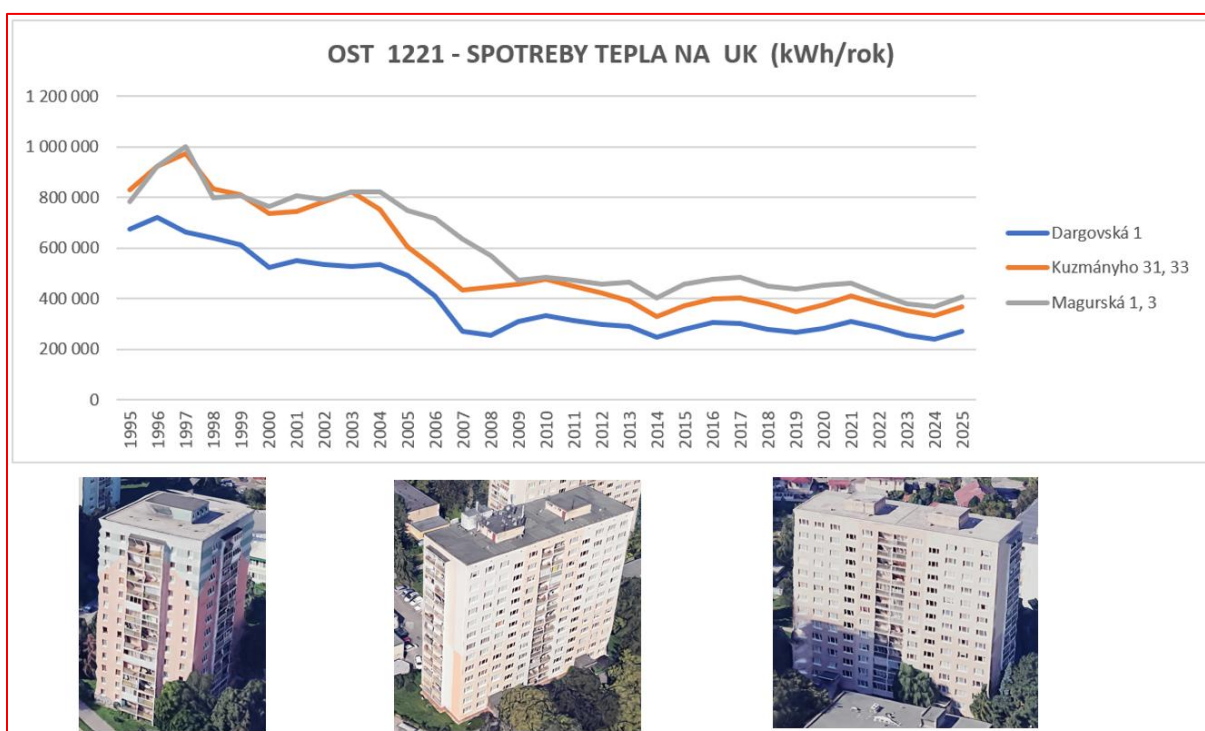
Obr. 11.12** OST 1104 - (Tatranská 1,3)



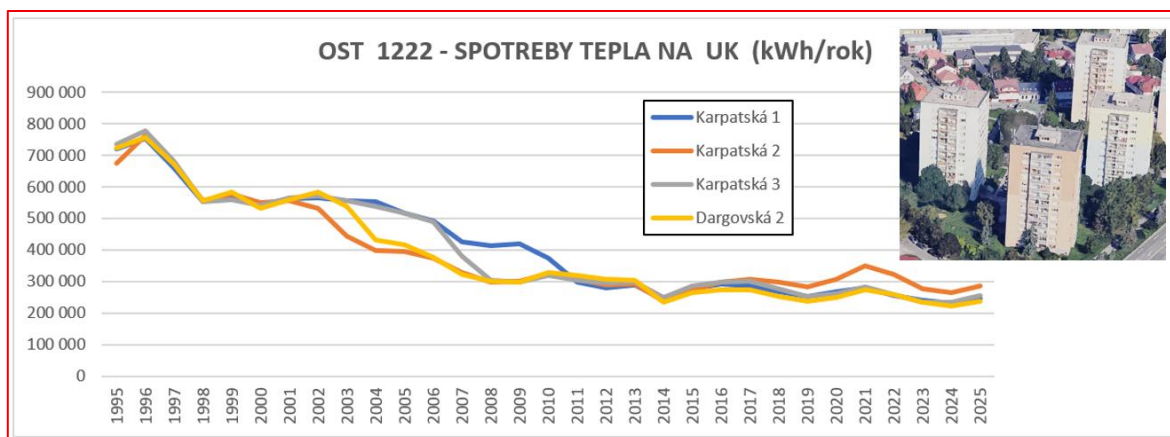
Obr. 11.13** OST 1105 - (Branisková 1,3; 5,7; 9,11; Branisková 2-24; Tatranská 2,4; Tatranská 6,8)



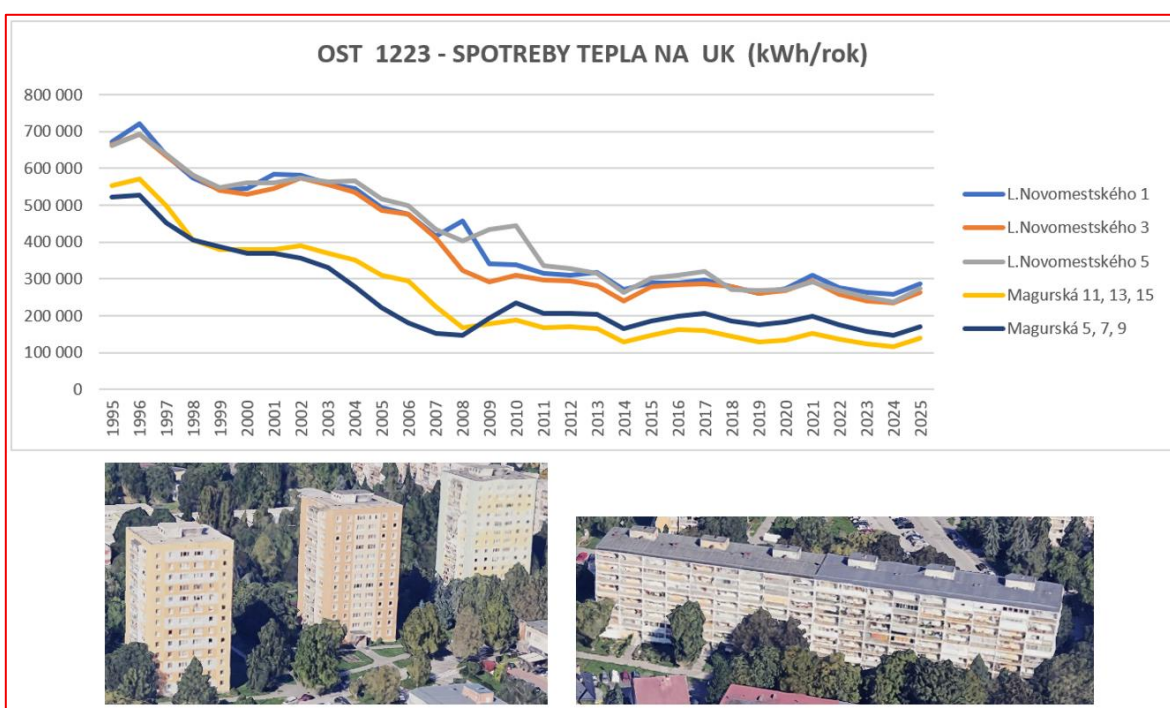
Obr. 11.14** OST 1209 - (Kuzmányho 35-41; Škultétyho 2; Vojenská 1-3; 4-6; 7-9; 10-12)



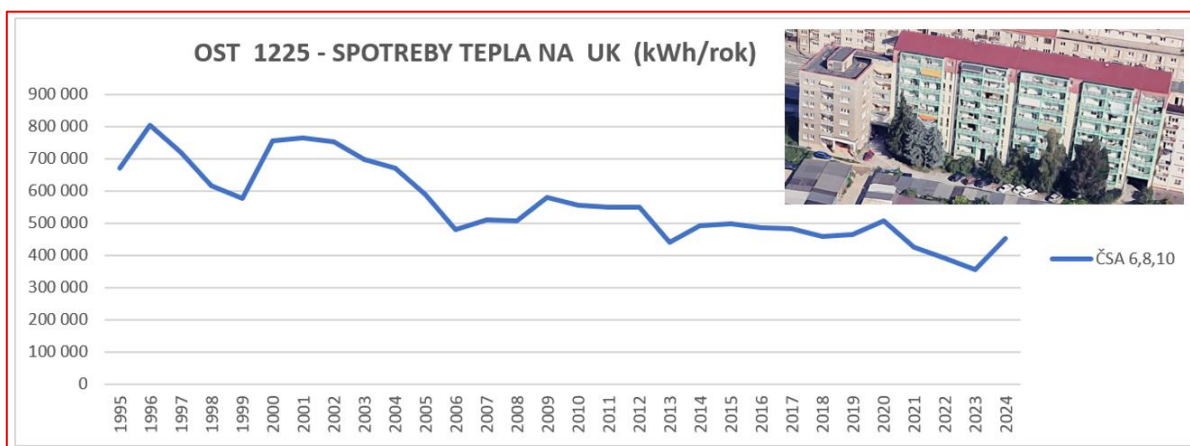
Obr. 11.15** OST 1221 - (Dargovská 1; Kuzmányho 31,33; Magurská 1,3)



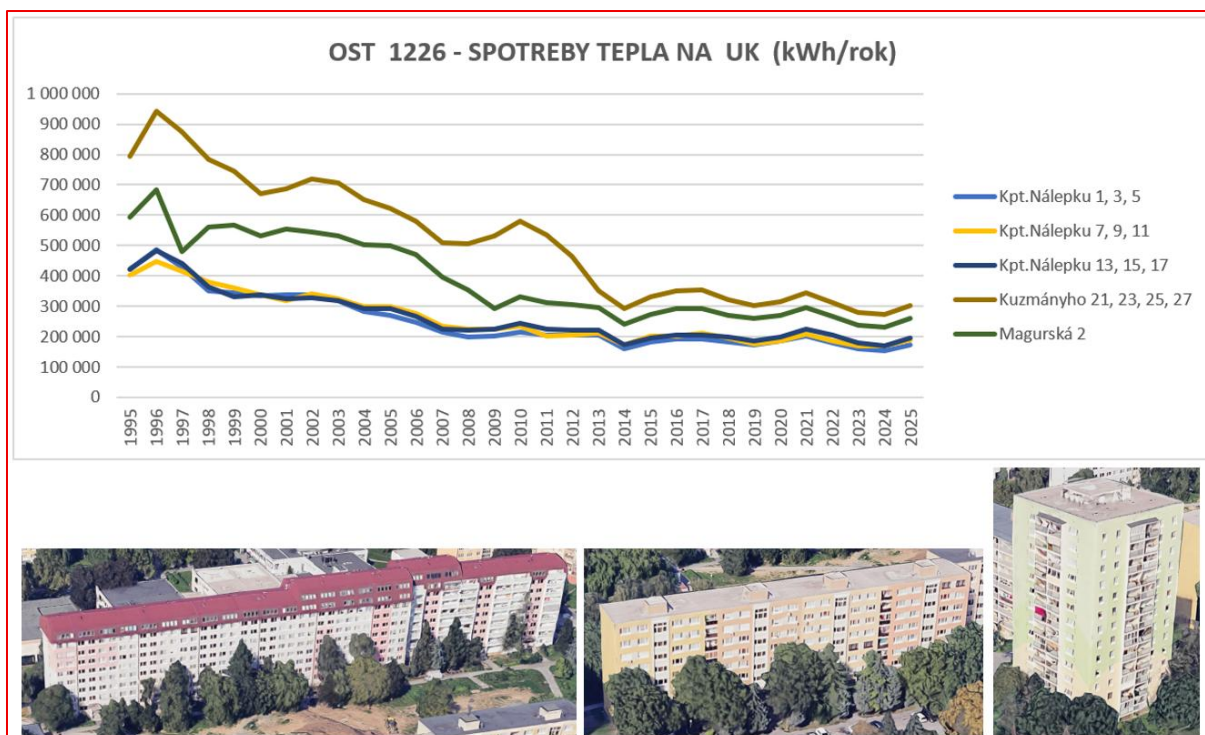
Obr. 11.16** OST 1009 - (Karpatská 1; Karpatská 2; Karpatská 3; Dargovská 2)



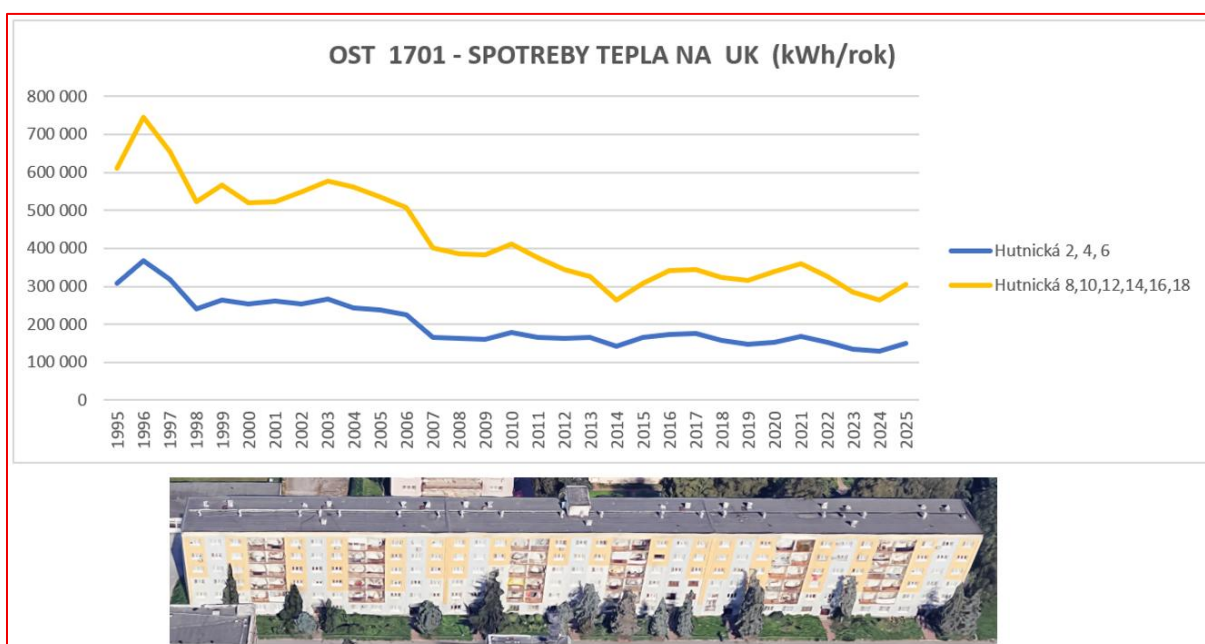
Obr. 11.17** OST 1223 - (L. Novomeského 1; 3; 5; Magurská 5,7,9; Magurská 11,13,15)



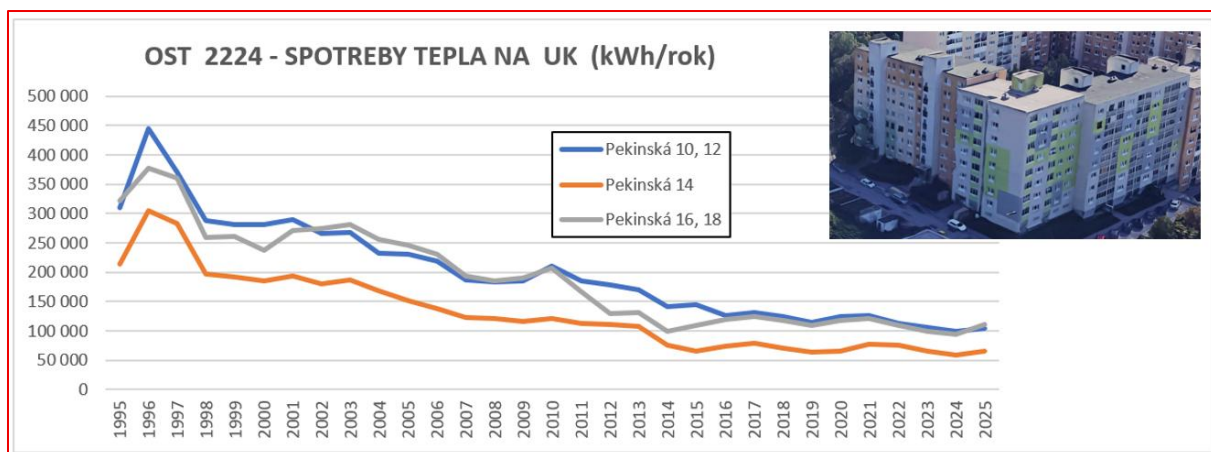
Obr. 11.18** OST 1225 - (Československej armády 6, 8, 10)



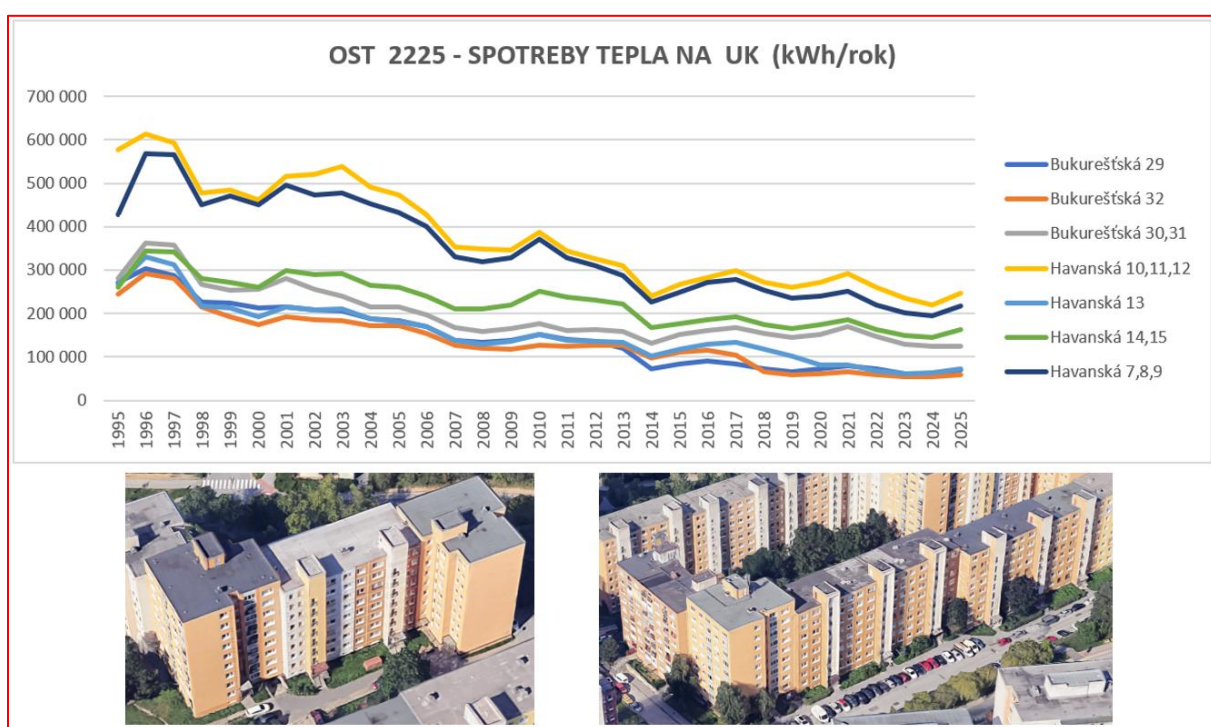
Obr. 11.19** OST 1226 - (Kpt.Nálepku 1-5; 7-11; 13-17; Kuzmányho 21-27; Magurská 2)



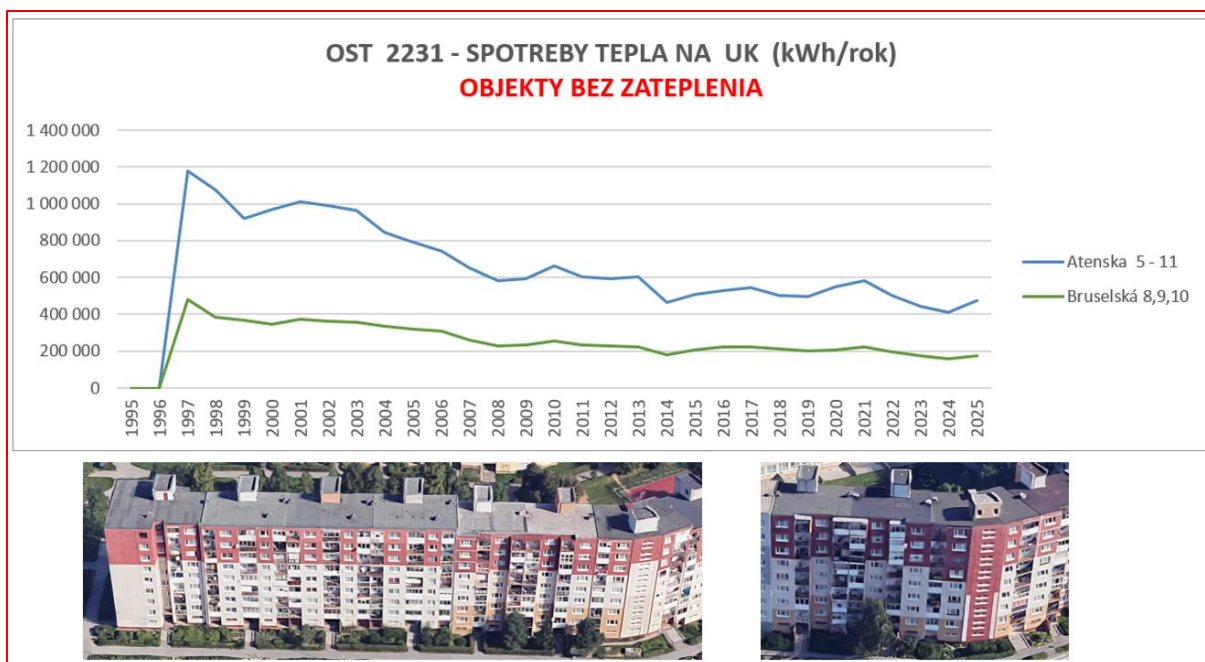
Obr. 11.20** OST 1701 - (Hutnícká 2-6; Hutnícká 8-18)



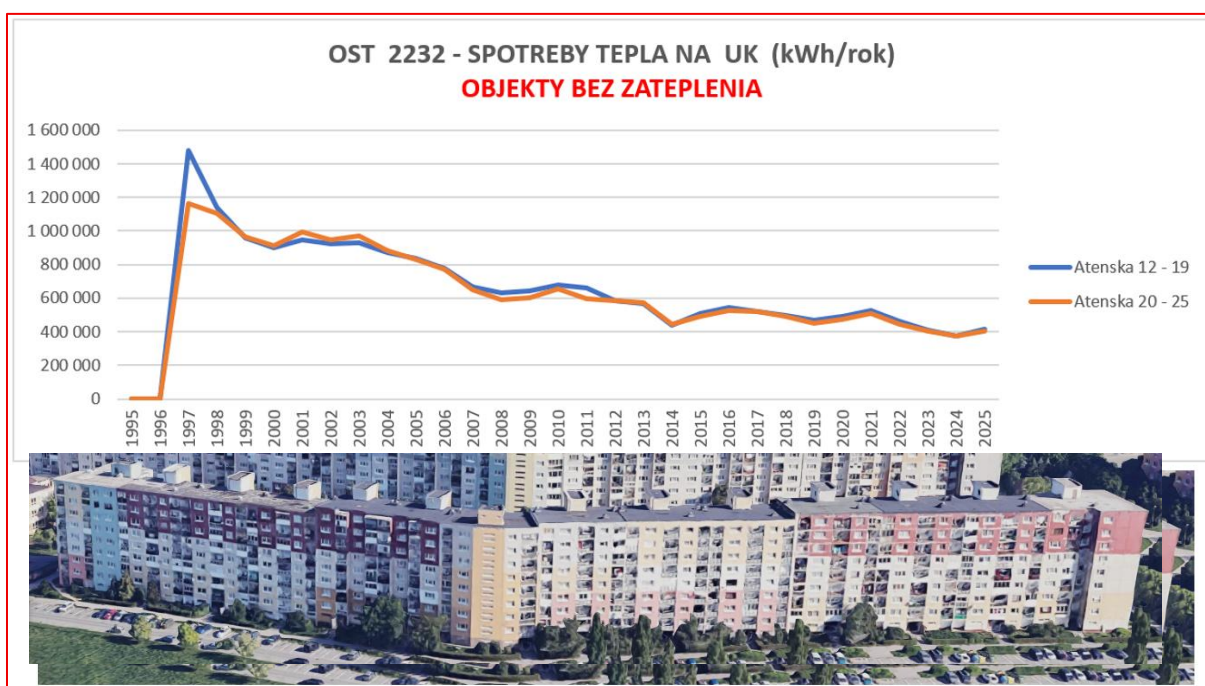
Obr.11.21** OST 2224 - (Pekinská 10,12; Pekinská 14; Pekinská 16,18)



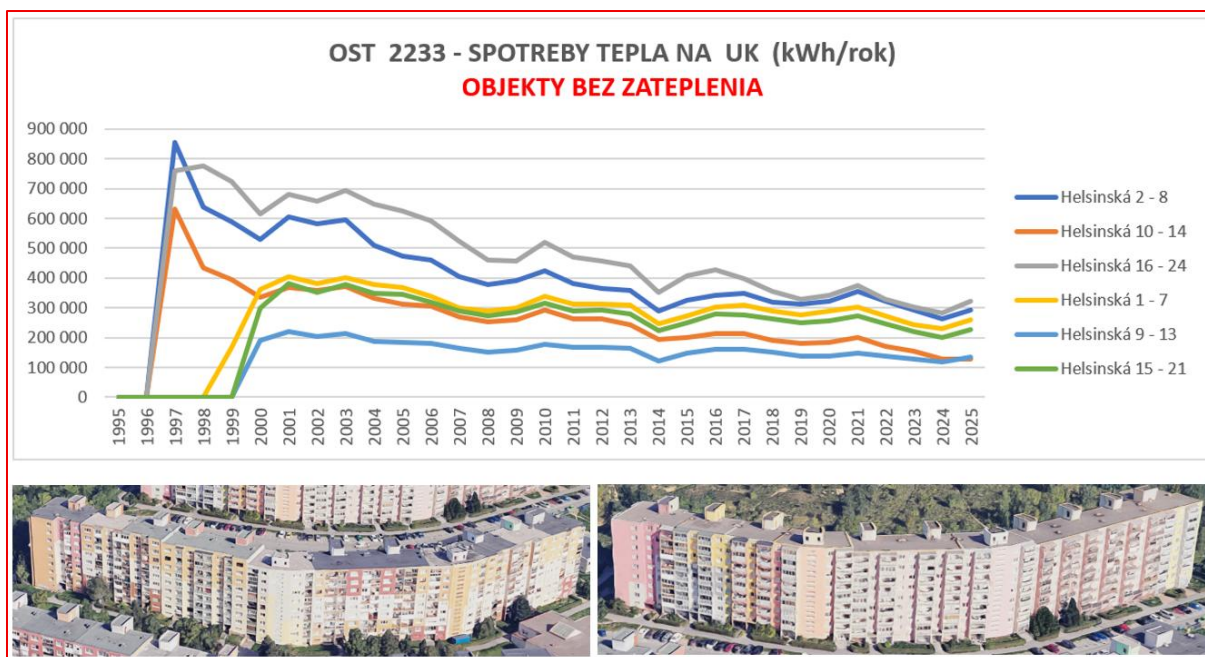
Obr. 11.22** OST 2225 - (Bukurešťská 29, 30-31, 32; Havanská 7-9, 10-12, 13, 14-15)



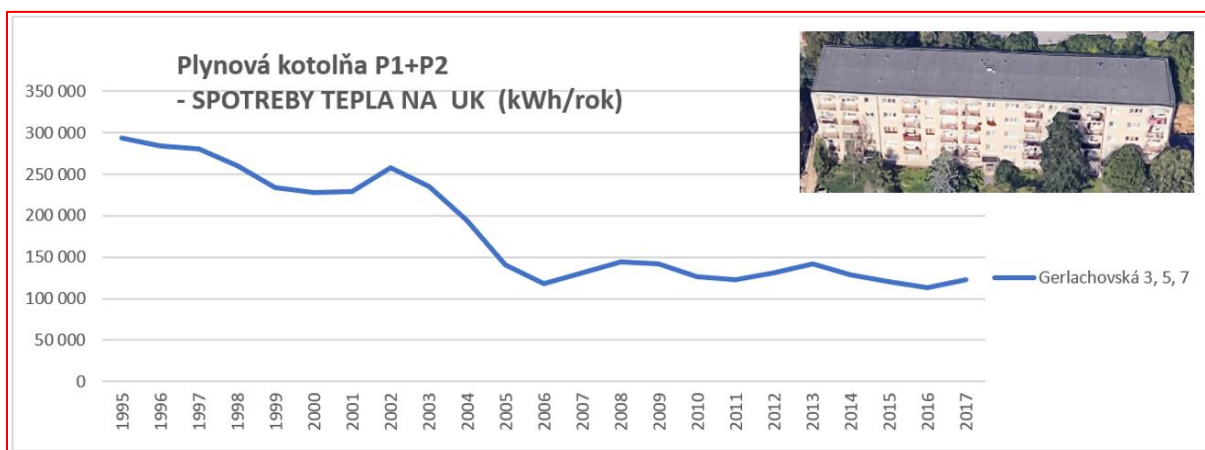
Obr. 11.23** OST 2231 - (Aténska 5 – 11; Bruselská 8 -10)



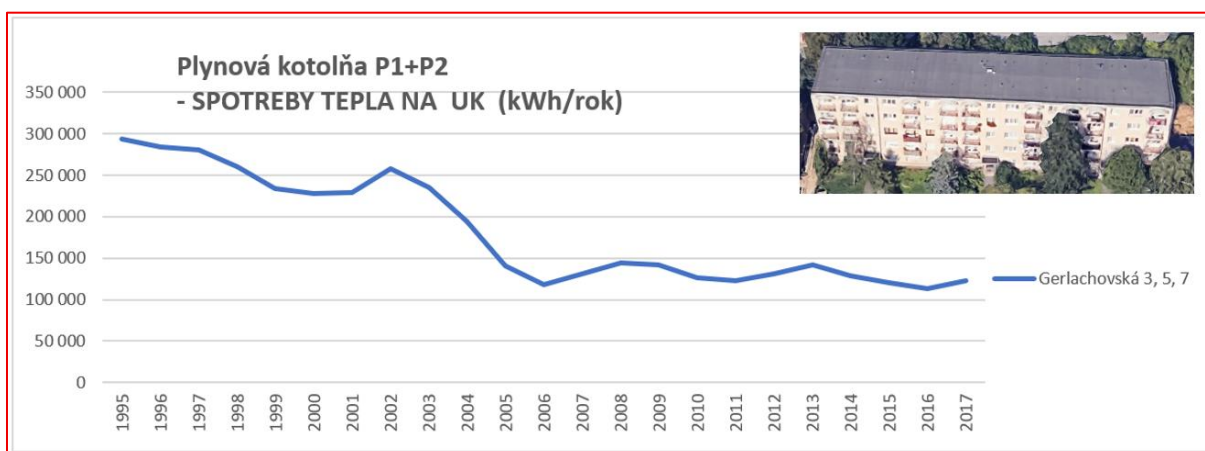
Obr. 11.24** OST 2232 - (Aténska 12 - 19; Aténska 20 - 25)



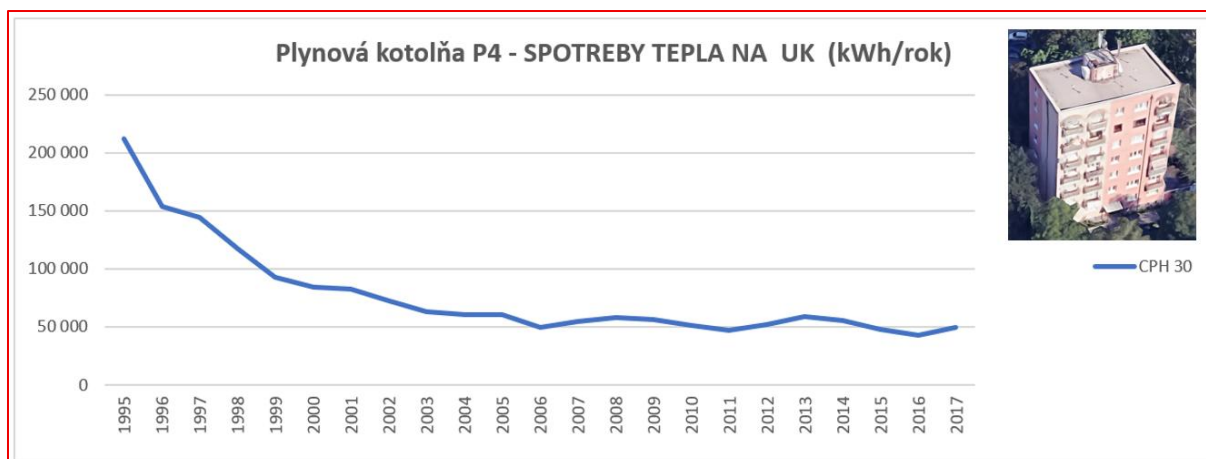
Obr. 11.25** OST 2233 - (Helsinská 2-8; 10-14; 16-24; Helsinská 1-7; 9-13; 15-21)



Obr. 11.26** OST 2234 - (Madridská 1; 2; 3; Viedenská 2 – 38; Viedenská 1 - 31)



Obr. 11.27** Plynová kotolňa P1+P2 - (Gerlachovská 3, 5, 7)



Obr. 11.28** Plynová kotolňa P4 - (Cesta pod hradovou 30)

11.4 Vyhodnotenie budov na bývanie

Na základe spracovanej analýzy bytových domov možno konštatovať, že realizované opatrenia predstavujú významný prínos z hľadiska energetickej efektívnosti aj dekarbonizácie prevádzky obytných budov. Hodnotenie vychádza z monitorovania bytového domu Čínska 25–31 v Košiciach a z databázy bytových domov napojených na systém centrálneho zásobovania teplom (CZT). Realizované opatrenia priniesli:

- takmer 50 % zníženie spotreby tepla na vykurovanie,
- rovnaké zníženie potreby primárnej energie,
- pokles emisií CO₂ približne o polovicu,
- vyššie využitie obnoviteľných zdrojov energie pri príprave teplej vody,
- zlepšenie energetickej hospodárnosti bytových domov a zníženie prevádzkových nákladov.

Výsledky potvrdzujú, že najväčší prínos dosahuje komplexná obnova budovy, pri ktorej sa kombinujú opatrenia na obálke budovy so zvyšovaním účinnosti technických systémov. Samotné zateplenie významne znižuje potrebu energie na vykurovanie, avšak ďalšie úspory a environmentálne prínosy prináša modernizácia vykurovacieho systému, optimalizácia prípravy teplej vody a využitie fotovoltiky.

Na základe toho je možné konštatovať, že komplexná obnova vedie k:

- zníženiu energetickej náročnosti budov približne o 49 %,
- zníženiu emisií skleníkových plynov o takmer 50 %,
- vyššej energetickej bezpečnosti a nižším prevádzkovým nákladom,
- zvýšeniu komfortu bývania a predĺženiu životnosti bytového fondu.

Z pohľadu dekarbonizácie predstavujú analyzované opatrenia účinný spôsob modernizácie existujúceho bytového fondu a sú v súlade s cieľmi znižovania spotreby energie a emisií CO₂ v sektore budov.

12. Dekarbonizačné stratégie pre obnovu budov

1. Uprednostniť komplexnú obnovu pred demoláciou a novou výstavbou

Zachovanie existujúcich nosných konštrukcií predstavuje najúčinnnejší spôsob znižovania zabudovaného uhlíka. Obnova umožňuje využitie existujúceho materiálového potenciálu budovy, minimalizuje potrebu výroby nových stavebných materiálov a významne redukuje emisie spojené s výstavbou. Prioritou by preto mala byť hĺbková obnova existujúcich budov namiesto ich nahrádzania novou výstavbou.

2. Realizovať integrovanú obnovu obálky budovy

Zníženie energetickej náročnosti musí vychádzať z komplexného návrhu obálky budovy zahŕňajúceho zateplenie všetkých ochladzovaných konštrukcií, elimináciu tepelných mostov, výmenu otvorových konštrukcií a zabezpečenie vzduchotesnosti spolu s riadeným vetraním s rekuperáciou tepla. Výsledky prezentovaných prípadových štúdií potvrdili, že práve tieto opatrenia prinášajú najvýznamnejšie zníženie prevádzkovej spotreby energie a emisií skleníkových plynov.

3. Dekarbonizovať technické systémy budov

Po minimalizácii potreby energie je potrebné nahrádzať fosílny zdroje energie nízkouhlíkovými technológiami. Stratégia obnovy by mala preferovať využitie tepelných čerpadiel, fotovoltických systémov, prípadne ďalších obnoviteľných zdrojov energie, doplnených inteligentnými systémami merania a regulácie, ktoré zabezpečia optimalizáciu prevádzky budovy počas celej jej životnosti.

4. Minimalizovať zabudovaný uhlík stavebných materiálov

Výber stavebných materiálov by nemal byť založený iba na tepelnotechnických vlastnostiach alebo obstarávacích nákladoch. Výsledky LCA analýz prezentovaných v práci potvrdzujú význam hodnotenia environmentálnej stopy materiálov, ich životnosti, recyklovateľnosti a potenciálu opätovného využitia. Prednosť by mali dostávať materiály s nízkym obsahom zabudovaného uhlíka, obnoviteľné materiály a výrobky s overenými environmentálnymi deklaráciami (EPD).

5. Integrovať princípy cirkulárnej ekonomiky do procesu obnovy

Obnova budov by mala rešpektovať princípy obehového hospodárstva prostredníctvom maximalizácie opätovného využitia existujúcich konštrukcií, recyklácie stavebných materiálov a navrhovania konštrukcií umožňujúcich jednoduchú demontáž a opätovné využitie po skončení ich životnosti. Takýto prístup významne znižuje materiálové toky aj environmentálne zaťaženie stavebného sektora.

6. Uplatňovať hodnotenie životného cyklu pri rozhodovaní

Navrhovanie obnovy by malo systematicky využívať kombináciu metód Life Cycle Assessment (LCA) a Life Cycle Costing (LCC). Výsledky publikácie ukazujú, že iba integrované environmentálne a ekonomické hodnotenie umožňuje identifikovať riešenia, ktoré zabezpečujú optimálnu rovnováhu medzi investičnými nákladmi, prevádzkovými úsporami a dlhodobými environmentálnymi prínosmi.

7. Rozširovať využívanie prírode blízkyh adaptačných opatrení

Experimentálny výskum vegetačných striech realizovaný v projekte greenIZOLA preukázal ich významný prínos pri stabilizácii tepelného režimu strešných konštrukcií, znižovaní tepelných tokov, retencii dažďovej vody a zlepšovaní mikroklimatických podmienok. Vegetačné strechy, biosolárne systémy a ďalšie prvky modro-zelenej infraštruktúry by sa preto mali stať štandardnou súčasťou obnovy budov, najmä v urbanizovanom prostredí.

8. Zavádzať inteligentné riadenie a digitálny monitoring budov

Výsledky monitorovania administratívnych, školských a obytných budov potvrdili, že významné úspory možno dosiahnuť aj optimalizáciou prevádzky technických zariadení. Súčasťou dekarbonizačnej stratégie by preto mala byť implementácia inteligentných systémov merania a regulácie, digitálnych dvojčiat budov a kontinuálneho monitorovania spotreby energie s cieľom priebežne vyhodnocovať účinnosť realizovaných opatrení a optimalizovať prevádzku.

9. Podporovať obnovu budov na základe reálnych prevádzkových dát

Výsledky práce ukazujú, že hodnotenie úspešnosti obnovy nesmie byť založené výlučne na projektových výpočtoch. Systematické monitorovanie spotreby energie, prevádzkových parametrov a vnútorného prostredia poskytuje objektívne informácie o skutočnej účinnosti realizovaných opatrení a vytvára podklady pre ich ďalšiu optimalizáciu.

10. Uplatňovať integrované rozhodovanie počas celého životného cyklu budovy

Úspešná dekarbonizácia obnovy budov si vyžaduje prechod od hodnotenia jednotlivých technických opatrení k integrovanému rozhodovaciemu procesu, ktorý súčasne zohľadňuje energetické, environmentálne, ekonomické, technické aj adaptačné aspekty. Takýto prístup umožňuje navrhovať obnovu budov, ktorá nielen znižuje emisie skleníkových plynov, ale zároveň zvyšuje odolnosť budov voči klimatickým zmenám, podporuje efektívne využívanie zdrojov a zabezpečuje dlhodobú udržateľnosť stavebného fondu.

13 Záver

Obnova existujúceho fondu budov predstavuje jeden z najvýznamnejších pilierov dekarbonizácie stavebníctva a zároveň jednu z rozhodujúcich podmienok na dosiahnutie cieľov klimateckej neutrality Európskej únie. Výsledky prezentované v tejto publikácii jednoznačne potvrdzujú, že úspešná transformácia existujúcich budov nemôže byť založená výlučne na znižovaní prevádzkovej spotreby energie. Vyžaduje si komplexný a systémový prístup, ktorý integruje environmentálne, ekonomické, technologické a spoločenské aspekty počas celého životného cyklu budovy. Len takto koncipovaná obnova dokáže zabezpečiť dlhodobé znižovanie emisií skleníkových plynov, efektívne využívanie prírodných zdrojov, ekonomickú udržateľnosť investícií a súčasne vytvárať kvalitné, zdravé a klimaticky odolné zastavané prostredie..

Predložené teoretické východiská potvrdzujú, že dekarbonizácia obnovy budov predstavuje komplexný proces založený na troch vzájomne prepojených pilieroch – systematickom znižovaní energetickej náročnosti budov, elektrifikácii technických systémov s využívaním obnoviteľných zdrojov energie a minimalizácii zabudovaného uhlíka prostredníctvom uplatňovania nízkouhlíkových materiálov a princípov cirkulárnej ekonomiky. Dosiahnutie skutočnej dekarbonizácie si pritom vyžaduje integrované hodnotenie všetkých fáz životného cyklu budovy, od výroby stavebných materiálov, cez realizáciu obnovy a prevádzku objektu až po jeho koniec životnosti a možnosti opätovného využitia alebo recyklácie materiálov. Kľúčovým metodickým nástrojom sa preto stáva hodnotenie životného cyklu (Life Cycle Assessment – LCA), ktoré umožňuje komplexne kvantifikovať environmentálne dopady jednotlivých opatrení, identifikovať dominantné zdroje emisií skleníkových plynov a optimalizovať návrh obnovy z hľadiska celkovej uhlíkovej stopy budovy. V spojení s hodnotením nákladov životného cyklu (Life Cycle Costing – LCC) vytvára LCA robustný rozhodovací rámec umožňujúci navrhovať technicky spoľahlivé, environmentálne efektívne a ekonomicky optimálne riešenia obnovy, ktoré rešpektujú princípy udržateľnej výstavby, obehového hospodárstva a dlhodobej klimateckej neutrality.

Komplexné hodnotenie prípadových štúdií realizovaných na vybraných budovách občianskej vybavenosti preukázalo, že hĺbková obnova predstavuje efektívny nástroj dekarbonizácie existujúceho stavebného fondu. Analýzy realizované na objektoch základných škôl a kultúrnych domov potvrdili, že aplikácia komplexných opatrení obnovy vedie k významnému zníženiu prevádzkovej spotreby energie, emisií skleníkových plynov a nákladov počas referenčného obdobia životného cyklu budovy. Súčasne výsledky environmentálneho hodnotenia preukázali, že voľba stavebných materiálov významne ovplyvňuje celkovú uhlíkovú stopu obnovy, pričom využitie materiálov na báze obnoviteľných zdrojov a materiálov s nižším zabudovaným uhlíkom predstavuje účinný spôsob znižovania environmentálnych dopadov bez negatívneho vplyvu na technické alebo ekonomické parametre navrhovaných riešení.

Výsledky experimentálneho výskumu vegetačných striech realizovaného v projekte greenZOLA zároveň potvrdili ich pozitívny vplyv na tepelný režim strešných konštrukcií, znižovanie hustoty tepelného toku a tepelných strát, stabilizáciu povrchových teplôt, retenciu zrážkovej vody a zlepšovanie mikroklimatických podmienok urbanizovaného prostredia. Environmentálne hodnotenie jednotlivých variantov strešných konštrukcií poukázalo na ich významný adaptačný aj dekarbonizačný potenciál pri obnove existujúcich budov.

Analýzy prevádzky administratívnych, školských a obytných budov ďalej preukázali, že významné úspory energie možno dosiahnuť nielen prostredníctvom stavebno-technickej obnovy, ale aj optimalizáciou systémov vykurovania, prípravy teplej vody, riadením prevádzky budov a priebežným monitoringom spotreby energie. Výsledky monitorovania jednoznačne potvrdili, že systematické sledovanie prevádzkových údajov predstavuje dôležitý nástroj na overovanie účinnosti realizovaných opatrení a identifikáciu ďalších možností zvyšovania energetickej efektívnosti budov.

Získané poznatky zároveň potvrdili, že rozhodovanie o optimálnom variante obnovy musí vychádzať z integrovaného hodnotenia energetických, environmentálnych a ekonomických kritérií. Okrem prevádzkovej energetickej hospodárnosti je preto nevyhnutné zohľadňovať aj zabudovaný uhlík stavebných materiálov, ich environmentálnu stopu, životnosť, recyklovateľnosť a potenciál opätovného využitia v súlade s princípmi cirkulárnej ekonomiky. Kombinácia metód LCA a LCC umožňuje identifikovať riešenia, ktoré zabezpečujú optimálnu rovnováhu medzi investičnými nákladmi, prevádzkovými úsporami, environmentálnymi prínosmi a dlhodobou technickou aj ekonomickou udržateľnosťou obnovy budov.

Predložená publikácia zároveň vytvára metodický a odborný základ pre ďalší výskum v oblasti komplexnej obnovy budov ako jedného z hlavných nástrojov dekarbonizácie stavebného sektora. Budúci výskum by mal byť orientovaný na rozvoj integrovaných metodík hodnotenia obnovy, ktoré budú prepájať environmentálne, ekonomické, energetické a prevádzkové aspekty počas celého životného cyklu budov. Osobitnú pozornosť je potrebné venovať rozširovaniu databáz environmentálnych charakteristík stavebných materiálov, aplikácii princípov cirkulárnej ekonomiky a znižovaniu zabudovaného uhlíka prostredníctvom využívania nízkoemisných a recyklovateľných materiálov. Perspektívnou oblasťou je aj implementácia digitálnych dvojčiat budov, inteligentných systémov monitorovania a riadenia prevádzky, ktoré umožnia priebežnú optimalizáciu energetickej hospodárnosti a overovanie účinnosti realizovaných opatrení. Neoddeliteľnou súčasťou ďalšieho výskumu zostáva experimentálne overovanie adaptačných opatrení, vrátane prvkov modro-zelenej infraštruktúry, ich vplyvu na energetické správanie budov, mikroklimu a odolnosť zastavaného prostredia voči dôsledkom meniacej sa klímy.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



MINISTERSTVO
ŠKOLSTVA, VEDY,
VÝSKUMU A ŠPORTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY