

eISSN 2730-1028

METEOROLOGICKÝ ČASOPIS

METEOROLOGICAL JOURNAL

2024

ROČNÍK 27 - ČÍSLO 1
VOLUME 27 - NUMBER 1



SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

Meteorologický časopis publikuje pôvodné vedecké práce z teoretického a aplikovaného výskumu, prehľadové články a krátke informácie z vedných odborov meteorológie, klimatológie, hydrológie, chemizmu atmosféry, znečistenia ovzdušia a numerického modelovania. Meteorologický časopis akceptuje aj príspevky z príbuzných vedeckých disciplín, napr. kvalita vody, vodné hospodárstvo, ekohydrológia, technika merania a diaľkový prieskum Zeme. Meteorologický časopis ako periodikum vychádza dvakrát ročne. Všetky zaslané príspevky sú recenzované dvoma nezávislými a anonymnými recenzentmi. Časopis je dostupný na <http://www.shmu.sk/sk/?page=31>.

The Meteorological Journal publishes original research papers and comprehensive reviews in all the subfields of the applied and theoretical research on meteorology, climatology, hydrology, atmospheric chemistry, air pollution, and numerical modelling. Relevant topics incorporating the related disciplines such as water quality, water resources management, eco-hydrology, instrumentation, and remote sensing are within scope. The Meteorological Journal is published twice a year. All submitted manuscripts are reviewed by two independent and anonymous reviewers (single-blind peer review). Journal is available at <http://www.shmu.sk/en/?page=31>.

REDAKČNÁ RADA – EDITORIAL BOARD

Šéfredaktor – Editor-in-Chief

Milan Onderka, PhD., Earth Science Institute, Slovak Academy of Sciences, Slovakia
milan.underka@savba.sk

Zástupca šéfredaktora – Associate Editor

Jozef Pecho, Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
jozef.pecho@shmu.sk

Členovia redakčnej rady – Handling editors

Martin Benko, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Branislav Chvíla, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Michal Danko, PhD., Institute of Hydrology, Slovak Academy of Sciences, Liptovský Mikuláš, Slovakia
Mária Derková, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Pavol Faško, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Marcel Garaj, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Prof. Martin Hanel, PhD., Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Prague, Czechia
Hana Hlaváčiková, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Prof. Kamila Hlavčová, PhD., Faculty of Civil Engineering STU, Bratislava, Slovakia
Prof. Silvia Kohnová, PhD., Faculty of Civil Engineering STU, Bratislava, Slovakia
Martin Kremler, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Livia Labudová, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Prof. Milan Lapin, PhD., Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Slovakia
Ondřej Ledvinka, Ph.D., Czech hydrometeorological institute, Prague, Czechia
Danica Lešková, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Katarína Mikulová, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Prof. Juraj Parajka, PhD., TU Wien, Vienna, Austria
Assoc. Prof. Petr Pišoft, Ph.D., Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, Czechia
Norbert Polčák, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Anna Pribullová, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Gánovce, Slovakia
Zora Snopková, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Banská Bystrica, Slovakia
Janka Szemesová, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Miroslav Šinger, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Prof. Bernard Šiška, PhD., Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia
Prof. Jaroslav Škvarenina, PhD., Technical University in Zvolen, Slovakia
Radim Tolasz, PhD., Czech hydrometeorological institute, Ostrava, Czechia
Jozef Vivoda, European Centre for Medium range Weather Forecast (ECMWF)
Roman Výleta, PhD., Faculty of Civil Engineering STU, Bratislava, Slovakia

Technická redaktorka – Assistant Editor

Katarína Pukančíková, Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
katarina.pukancikova@shmu.sk

VYDAVATEĽ – PUBLISHER

© Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, máj 2024
Jeséniova 17, P. O. Box 15, 833 15 Bratislava 37
IČO 00 156 884
R. č. MK SR: 3268/09
eISSN 2730-1028

METEOROLOGICKÝ ČASOPIS

METEOROLOGICAL JOURNAL

2024

ROČNÍK 27 – ČÍSLO 1

VOLUME 27 – NUMBER 1

SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV
SLOVAK HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE



CONTENTS

ANALÝZA METEOROLOGICKÝCH PODMIENOK NAJTRAGICKEJŠEJ LAVÍNY NA SLOVENSKU DŇA 6. 2. 1924 V OSADE RYBŔ VO VEĽKEJ FATRE	
Katarína Mikulová, Martin Vojtek, Gabriela Ivaňáková, Norbert Polčák, Pavol Faško	3
IMPACT OF IMPLEMENTATION IPCC 2019 REFINEMENT ON EMISSIONS IN SLOVAKIA	
Janka Szemesová, Kristína Tonhauzer, Ján Horváth	13
RESULTS OF STATISTICAL SURVEY FOCUSED ON HOUSEHOLD HEATING, STRUCTURE OF COMBUSTION DEVICES AND FUEL CONSUMPTION	
Roman Mach, Marcel Zemko, Janka Szemesová, Kristína Tonhauzer, Lenka Zetočová.....	25
USE OF H2O ML AND FEATURE ENGINEERING FOR WATER TEMPERATURE PREDICTION IN THE LITAVA RIVER	
Zbynek Bajtek	33
BIOMONITORING OF GROUND-LEVEL OZONE IN THE HIGH TATRA MOUNTAINS	
Svetlana Varšová, Veronika Lukasová, Milan Onderka, Dušan Bilčík.....	41
FOREST AREAS AT RISK FOR THE OCCURRENCE OF INTENSE RAINFALL IN SLOVAKIA	
Veronika Lukasová, Petr Štěpánek, Svetlana Varšová, Anna Buchholcerová, Dušan Bilčík, Pavol Nejedlík	49

INFORMATION

Evaluation of the hydrological year 2023	
Katarína Kotríková, Lotta Blaškovičová, Soňa Liová, Katarína Slivková, Beáta Síčová	59
Overview of the groundwater situation in the hydrological year 2023	
Valéria Slivová, Michaela Kurejová Stojkovová, Zuzana Paľušová.....	64
XXVIIth snow meeting in Jeseníky	
Lenka Balážovičová.....	69

OBSAH

ANALÝZA METEOROLOGICKÝCH PODMIENOK NAJTRAGICKEJŠEJ LAVÍNY NA SLOVENSKU DŇA 6. 2. 1924 V OSADE RYBŔ VO VEĽKEJ FATRE	
Katarína Mikulová, Martin Vojtek, Gabriela Ivaňáková, Norbert Polčák, Pavol Faško	3
DOPAD IMPLEMENTÁCIE IPCC REFINEMENT Z ROKU 2019 NA EMISIE NA SLOVENSKU	
Janka Szemesová, Kristína Tonhauzer, Ján Horváth	13
VÝSLEDKY ŠTATISTICKÉHO ZISŤOVANIA ZAMERANÉHO NA VYKUROVANIE DOMÁCNOSTÍ, ŠTRUKTÚRU SPAĽOVACÍCH ZARIADENÍ A SPOTREBU PALÍV	
Roman Mach, Marcel Zemko, Janka Szemesová, Kristína Tonhauzer, Lenka Zetočová.....	25
VYUŽITIE H2O ML A FEATURE ENGINEERINGU PRE PREDIKCIU TEPLoty VODY V RIEKE LITAVA	
Zbynek Bajtek	33
BIOMONITORING PRÍZEMNÉHO OZÓNU VO VYSOKÝCH TATRÁCH	
Svetlana Varšová, Veronika Lukasová, Milan Onderka, Dušan Bilčík.....	41
RIZIKOVÉ LESNÉ OBLASTI PRE VÝSKYT INTENZÍVNYCH ZRÁŽOK NA SLOVENSKU	
Veronika Lukasová, Petr Štěpánek, Svetlana Varšová, Anna Buchholcerová, Dušan Bilčík, Pavol Nejedlík	49

INFORMÁCIE

Zhodnotenie hydrologického roka 2023	
Katarína Kotríková, Lotta Blaškovičová, Soňa Liová, Katarína Slivková, Beáta Síčová.....	59
Prehľad situácie v podzemnej vode v hydrologickom roku 2023	
Valéria Slivová, Michaela Kurejová Stojkovová, Zuzana Paľušová.....	64
XXVII. snehárské stretnutie v Jeseníkoch	
Lenka Balážovičová.....	69

ANALÝZA METEOROLOGICKÝCH PODMIENOK NAJTRAGICKEJŠEJ LAVÍNY NA SLOVENSKU DŇA 6. 2. 1924 V OSADE RYBÔ VO VEĽKEJ FATRE

KATARÍNA MIKULOVÁ¹, MARTIN VOJTEK², GABRIELA IVANÁKOVÁ¹, NORBERT POLČÁK^{1,3}, PAVOL FAŠKO¹

¹ Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava,

katarina.mikulova@shmu.sk, gabriela.ivanakova@shmu.sk, norbert.polcak@shmu.sk, pavol.fasko@shmu.sk

² Veliteľstvo Vzdušných síl OS SR, Jána Jiskru 10, 960 01, Zvolen, martin.vojtek@mil.sk

³ Katedra fyzickej geografie a geoinformatiky, Prírodovedecká Fakulta UK v Bratislave, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava

The winter season of 1923/24 was extremely abundant in snow and avalanches in the highest mountains of Slovakia. The most fatal avalanche of that season was the one which was triggered on the south-eastern grassy slopes of the Krížna massif (the Veľká Fatra mountains; 1,574 m a.s.l.) during the night of 6th February 1924. The analysis of meteorological and snow conditions of this tragedy was carried out. The NOAA/CIRES/DOE(V3) reanalysis of the 500 hPa geopotential, surface pressure field and 850 hPa temperature were used to identify the main synoptic-scale features leading to the deadliest snow avalanche so far recorded in Slovakia. Moreover, 102 precipitation stations and 10 climatological stations were used in snow load analysis. The weather situation in the period from 2nd to 6th February 1924 had probably decisive impact on the avalanche formation. The deepening of the low over the Baltic states associated with frontal system over Slovakia played a critical role. The north-west cyclonic situation prevailed, during which a lot of snow fell on the north-western (upwind) slopes of the mountains due to orographic uplift. This effect was recognised over the Veľká Fatra mountains ridge and the area of the Krížna peak as well, where about 60 cm of fresh snow had fallen during 4 days. Due to the lack of trees at the mountain tops, the snow was easily drifted by the north-western wind to the leeward side of the mountain range. It created conditions for a high snow cover on the eastern slopes. The temperature at 850 hPa level was below the freezing point from 2nd to 5th February. The main factor of the avalanche along with heavy snowfall was the strong wind.

Zimná sezóna 1923/24 bola v najvyšších pohoriach Slovenska mimoriadne bohatá na sneh a lavíny. Najtragickejšia lavínová udalosť v histórii Slovenska sa stala v noci 6. februára 1924. Z juhovýchodných svahov masívu Krížna (1 574 m n. m.), v pohorí Veľká Fatra, spadla lavína na osadu Rybô. V uvedenom príspevku sme analyzovali meteorologické a snehové podmienky, ktoré viedli k pádu tejto lavíny. Na analýzu synoptického stavu boli použité spätné analýzy (reanalýzy) NOAA/CIRES/DOE(V3), mapy prízemného tlakového poľa a geopotenciálu v hladine 500 hPa a teplota vzduchu v hladine 850 hPa. Okrem toho boli použité aj historické údaje zo 102 zrážkomerných staníc a 10 klimatologických staníc. Rozhodujúci vplyv na vznik lavíny mala pravdepodobne poveternostná situácia v období od 2. do 6. februára 1924. Prevládala severozápadná cyklonálna situácia, počas ktorej spadlo veľa snehových zrážok na severozápadných návetriach hôr. Sneženie bolo sprevádzané severozápadným vetrom, ktorý ukladal snehové zrážky aj na záveternú polohu za hlavný hrebeň, čím sa vytvorili predpoklady na vytvorenie vysokej a nestabilnej snehovej pokrývky za hlavným hrebeňom. Tento efekt bol zaznamenaný na hrebeni Veľkej Fatry a tiež v oblasti vrchu Krížna, kde za 4 dni napadlo okolo 60 cm čerstvého snehu. Kvôli odlesneniu vrcholových častí bol sneh ľahko zanášaný na záveternú stranu pohoria. Na východných svahoch sa tak vytvorili podmienky pre výskyt vysokej snehovej pokrývky. Teplota na úrovni 850 hPa bola od 2. do 5. februára pod bodom mrazu. Hlavnou meteorologickou príčinou extrémne veľkej a tragickej lavíny bolo intenzívne sneženie spojené so silným západným až severozápadným vetrom, ktorý previeval sneh do odtrhového pásma.

Key words: snow, avalanche, Rybô village, winter season of 1923/1924, Krížna

ÚVOD

Zimná sezóna 1923/24 bola vo vyšších nadmorských výškach Slovenska mimoriadne bohatá na sneh. Dôsledkom bohatej snehovej nádielky bol aj častý výskyt lavín (T&A, 1924; K-P, 1924). A práve táto zima sa v histórii Slovenska spája aj s tou najtragickejšou lavínovou udalosťou. Lavína, ktorá spadla v noci zo 6. na 7. februára 1924 v osade Rybô, v Hornojeleneckej doline pod juhovýchodnými svahmi Krížnej (1574 m n. m.) vo Veľkej Fatre, si vyžiadala najviac obetí na životoch. Zasypala až 22 ľudí, pričom osemnásť z nich (z toho 15 detí) neprežilo. Množstvo snehu v lavíne bolo také veľké, že sa sneh neroztopil ani cez leto. Výška nánosu snehu bola až 35 metrov. Lavína bola dlhá približne

2,5 km a pri svojom páde prekonal výšku 760 metrov. Podľa odhadu sa v nej nachádzalo 600 000 ton snehu (Bukovčan, 1960). Prachová lavína vyvinula veľmi veľký nárazový tlak a vysokú rýchlosť (až do 180 km/h). Podľa dnešnej medzinárodnej klasifikácie lavín by sa táto lavína zaradila do kategórie veľmi veľkej lavíny, čo je najväčšia veľkosť (Ivanáková et al., 2022). Lavína sa zastavila až v hornej časti osady Rybô, kde zničila a zasypala tri domy a ďalšie dva poškodila. Na Obr. 1 a 2 sú autentické fotografie po tejto tragickej udalosti.

Zmienku o tejto udalosti a jej tragické následky zaznamenal aj pozorovateľ meteorologickej stanice Staré Hory,



Obrázok 1. Pád lavíny a záchranné práce v osade Rybô (Zdroj: Archív Strediska lavínovej prevencie HZS, Archív OcÚ Staré Hory).
Figure 1. Avalanche fall and rescue work in the Rybô village.



Obrázok 2. Fotografie z pohrebu obetí lavíny (Zdroj: Archív OcÚ Staré Hory).
Figure 2. Photographs from the funeral of avalanche victims.

horár štátnych lesov, Ján Košík (Obr. 3). Do poznámok v mesačnom výkaze poznamenal: „6.II. o ½ 22. hodine z holi Križna na juh ležiacej čiastky, nadmorská výška 1000-1200 m, svah 40-44 stupňov, snehová lavína zbehla ktorá 3 obydlené domi z 22 dušami sebou zmietla, stýchtok 4 duše sú pri živote, 18 mŕtvych. Mŕtvoli po 10 dňovej ťažkej práci sa podarilo zo snehu vykopať. Výška lavíny 5-15 metrov, šírka 100-200 m. 7.II., 10.-11.II. vo viac miestach lavína zbehla, tieto lavíny v štátnych lesoch veľkú škodu spravili. Výška napadlého snehu je 10 m. Záveje také, že len koncom mája môžeme rátať na roztopenie.“

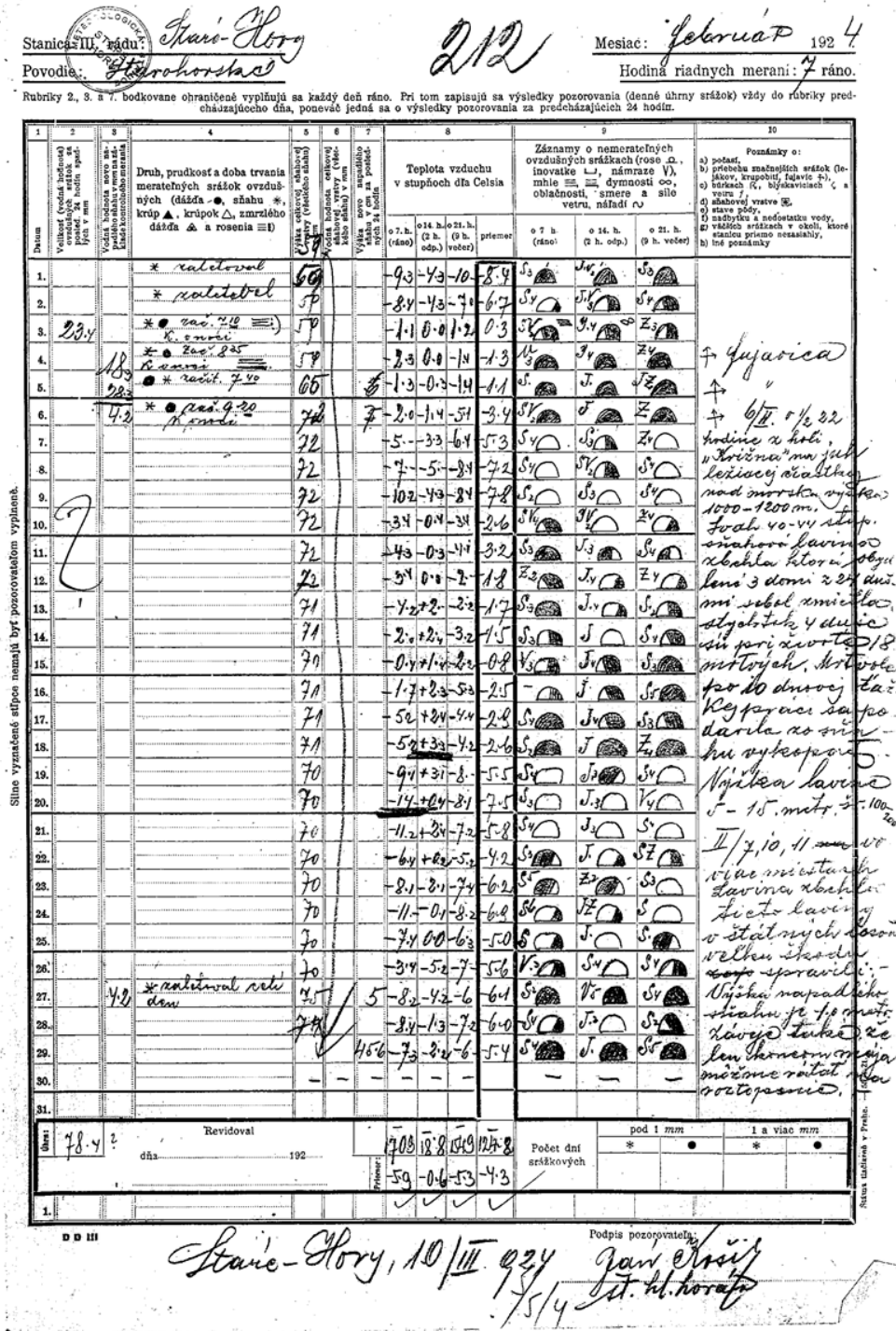
V predkladanom príspevku bolo našou snahou spätne zanalyzovať meteorologické a klimatologické podmienky, ktoré predchádzali vzniku pádu lavíny. Napriek tomu, že pred sto rokmi neboli dostupné radarové a družicové merania, sieť meteorologických staníc bola redšia ako v súčasnosti, v archíve Slovenského hydrometeorologického ústavu sa nachádzajú historické klimatologické a zrážkomerné výkazy zo staníc, ktoré boli v tom období v prevádzke. Už od druhej polovice 19. storočia vznikali na našom území prvé meteorologické stanice. Zriadoval ich Centrálny ústav pre meteorológiu a geomagnetizmus vo Viedni a neskôr Kráľovský ústredný ústav pre meteorológiu a zemský magnetizmus v Budapešti. Na konci 19. storočia sa veľmi rozšírili najmä zrážkomerné stanice, ktoré znamenávali atmosférické zrážky na území Slovenska, a to

zväčša pre potreby výstavby vodohospodárskych zariadení na riekach, ale aj vzhľadom na množstvo povodní (Ivaňáková et al., 2022). Keďže v tomto období boli merania unifikované jednotnou metodikou a používali sa štandardizované kalibrované prístroje na celom území bývalého Rakúska-Uhorska, zaznamenané historické údaje sú na vysokej profesionálnej úrovni.

POUŽITÉ ÚDAJE

Pre analýzu synoptickej situácie, ktorá predchádzala pádu dosiaľ najtragickejšej lavíny, boli použité spätné analýzy (reanalýzy) NOAA/CIRES/DOE(V3) (National Oceanic and Atmospheric Administration – Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences - U. S. Department of Energy; Slivinski et al., 2019). Tie sú k dispozícii pre oblasť Európy pre každý deň od 1. januára 1836 k hlavným synoptickým termínom (0, 6, 12, 18 UTC) na stránke www.wetterzentrale.de. Analyzované boli mapy prízemného tlakového poľa a geopotenciál v hladine 500 hPa (výška cca 5 500 m n. m.) a teplota vzduchu v hladine 850 hPa (výška cca 1 500 m n. m.). Pre validáciu reanalýz boli použité údaje z najbližších vysokohorských staníc, ktoré boli v tom čase v prevádzke, a to údaje zo stanice Lysá Hora (1322 m n. m.) v Českej republike a Zakopaného (857 m n. m.) v Poľsku.

Obrázok 3. Zrážkomerný výkaz zo stanice Staré Hory z februára 1924 (Zdroj: Archív SHMÚ).
 Figure 3. Precipitation report from Staré Hory station from February 1924.



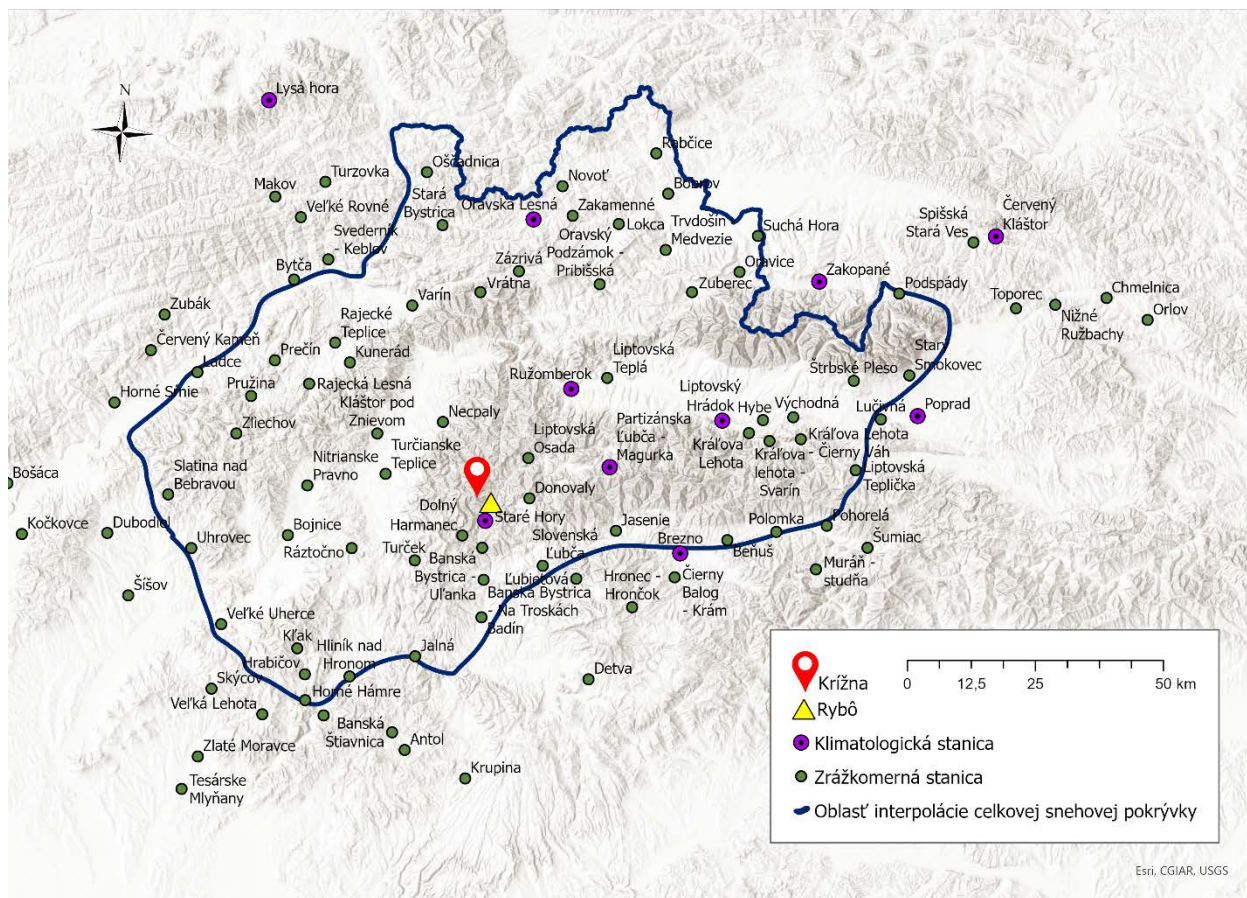
Pre analýzu klimatických pomerov a celkovej snehovej pokrývky boli použité údaje zo 10 zrážkomerných a 10 klimatologických staníc z archívu Slovenského hydrometeorologického ústavu (Obr. 4). Mapy celkovej snehovej pokrývky v analyzovanej oblasti boli vytvorené v prostredí GIS. Pri interpolácii v prostredí ArcGIS bola použitá metóda inverzne vázenej vzdialenosti (IDW), kde doplnkovou premennou bola nadmorská výška reprezentovaná digitálnym modelom terénu (DEM500).

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na začiatku roka 1924 prevládala cyklónálny charakter počasia so snehovými zrážkami. Vo výškovej hladine 850 hPa (cca 1500 m n. m.) bolo väčšinou chladno, -10 až -15 °C. Od 10. januára do 20. januára 1924 prevládala na našom území väčšinou anticyklónálny charakter počasia. Stred tlakovej výše sa nachádzal severovýchodne od strednej Európy. Po okraji tlakovej výše prudil od juhovýchodu do

Obrázok 4. Mapa použitých klimatologických a zrážkomerných staníc v analyzovanej oblasti.

Figure 4. Map of used climatological and precipitation stations in the analysed area.



našej oblasti teplejší vzduch. Predpokladáme, že v tomto období sa mohli tvoriť teplotné inverzie. Vo výškovej hladine 850 hPa sa oteplilo na približne -3 až 0 °C a v období od 15. do 16. januára 1924 sa ochladilo na približne -10 °C. Následne sa opäť začalo oteplovať, a do 20. januára sa teplota vzduchu pohybovala okolo 0 °C.

Od 20. januára 1924 sa situácia zmenila. Od západu, postupne od severozápadu až severu, začal do našej oblasti prúdiť vlhkejší a postupne aj chladnejší vzduch. Od 23. januára sa vo vyšších vrstvách ovzdušia vytvorila brázda nízkeho tlaku vzduchu a naše územie sa dostalo na jej zadnú stranu do studeného a vlhkého severného prúdenia. Postupne sa ochladilo vo výškovej hladine 850 hPa na -15 °C, 24. januára až na -20 °C. Od 25. do 28. januára ovplyvňovala počasie v strednej Európe rozsiahla oblasť vysokého tlaku vzduchu s dvomi samostatnými stredmi. Jeden stred sa nachádzal nad Biskajským zálivom, druhý na severe európskej časti Ruska. Po prednej strane oblasti vysokého tlaku vzduchu prúdil do strednej Európy od severovýchodu chladný vzduch. Vo výškovej hladine 850 hPa bola teplota vzduchu od -15 °C (25. januára 1924) do približne -7 °C (28. januára 1924). V dňoch 28. a 29. januára 1924 nastúpil od severozápadu cyklónálny charakter počasia so zrážkami, pričom v 850 hPa hladine bola teplota vzduchu v rozmedzí -7 až -10 °C. Od 30. januára do 1. februára 1924 prevlá-

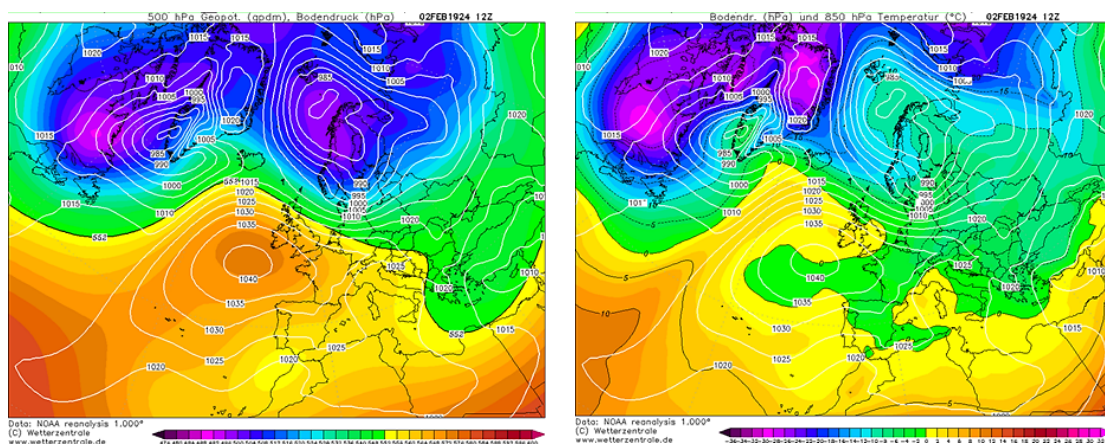
dalo anticyklónálne počasie bez zrážok, vo výške 850 hPa s teplotou vzduchu okolo -10 °C.

Dňa 1. februára 1924 bolo v oblasti Starých Hôr po celý deň zamračené pravdepodobne nízkou oblačnosťou (10/10 pokrytia oblohy oblakmi), teplota vzduchu klesala v ranných a večerných hodinách až k -10 °C, popoludní sa udržiavala okolo -5 °C. Bolo zaznamenané aj slabé sneženie. Vial slabý severný až severovýchodný vietor s priemernou rýchlosťou do 10 km/h. Celková výška snehovej pokrývky dosahovala okolo 59 cm.

Rozhodujúci vplyv na vytvorenie vhodných podmienok pádu lavíny mala poveternostná situácia počas nasledujúcich dní 2. až 6. februára 1924 (Obr. 5 až 11). Nad Škandináviou sa prehĺbila rozsiahla oblasť nízkeho tlaku vzduchu. Prevládala severozápadná cyklónálna situácia, počas ktorej spadlo veľa snehových zrážok na severozápadných návetriach hôr. Pohoria, ktoré sú kolmo orientované na toto prúdenie, majú silný náveterný efekt. Podobne je to i vo Veľkej Fatre a v oblasti Krížnej. Sneženie bolo sprevádzané severozápadným vetrom, ktorý ukladal snehové zrážky aj na zúženie polohu za hlavný hrebeň, čím sa vytvorili predpoklady na vytvorenie vysokej a nestabilnej snehovej pokrývky za hlavným hrebeňom. Množstvo snehu vytváralo preveje. Teplota vo výškovej hladine 850 hPa bola pod bodom mrazu (Obr. 5 až 11).

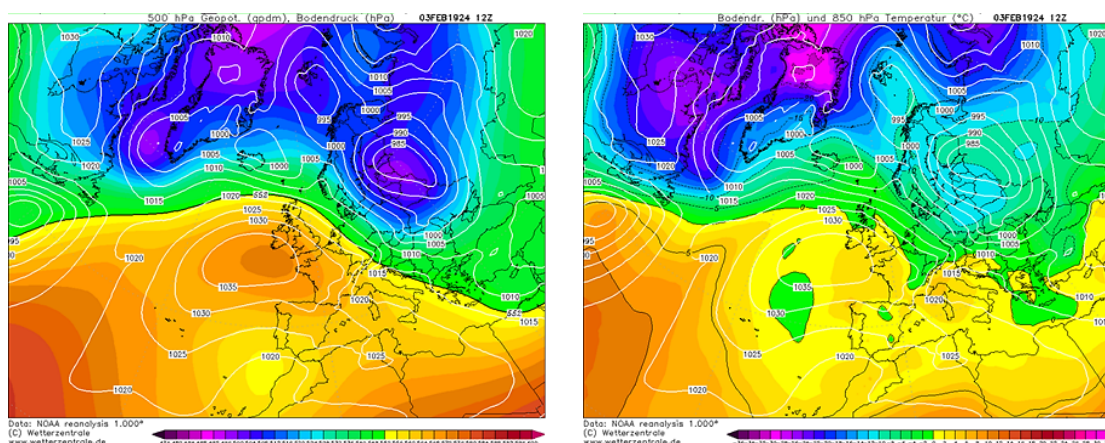
Obrázok 5. Synoptická situácia z 2. februára 1924 vo výškovej hladine 500 hPa (vľavo), biele izočiarey sú tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (hPa), farebná škála predstavuje geopotenciálnu výšku hladiny 500 hPa, vpravo je teplota vzduchu v hladine 850 hPa o 12 UTC (Zdroj: NOAA/-CIRES/DOE).

Figure 5. Synoptic situation of February 2nd 1924 at 500 hPa level (left), white isolines represent air pressure converted to sea level (hPa), color scale represents geopotential height at 500 hPa level, right is air temperature at 850 hPa level at 12 UTC.



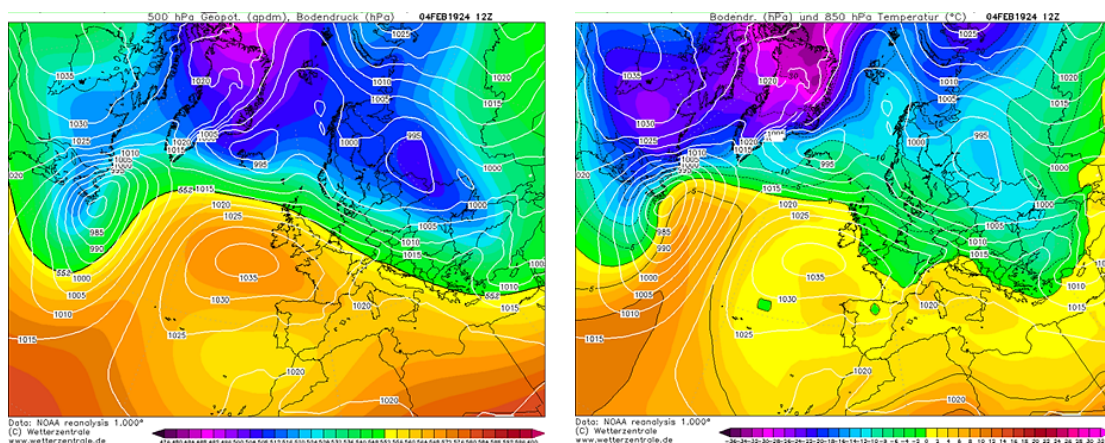
Obrázok 6. Synoptická situácia z 3. februára 1924 vo výškovej hladine 500 hPa (vľavo), biele izočiarey sú tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (hPa), farebná škála predstavuje geopotenciálnu výšku hladiny 500 hPa, vpravo je teplota vzduchu v hladine 850 hPa o 12 UTC (Zdroj: NOAA/-CIRES/DOE).

Figure 6. Synoptic situation of February 3rd 1924 at 500 hPa level (left), white isolines represent air pressure converted to sea level (hPa), color scale represents geopotential height at 500 hPa level, right is air temperature at 850 hPa level at 12 UTC.



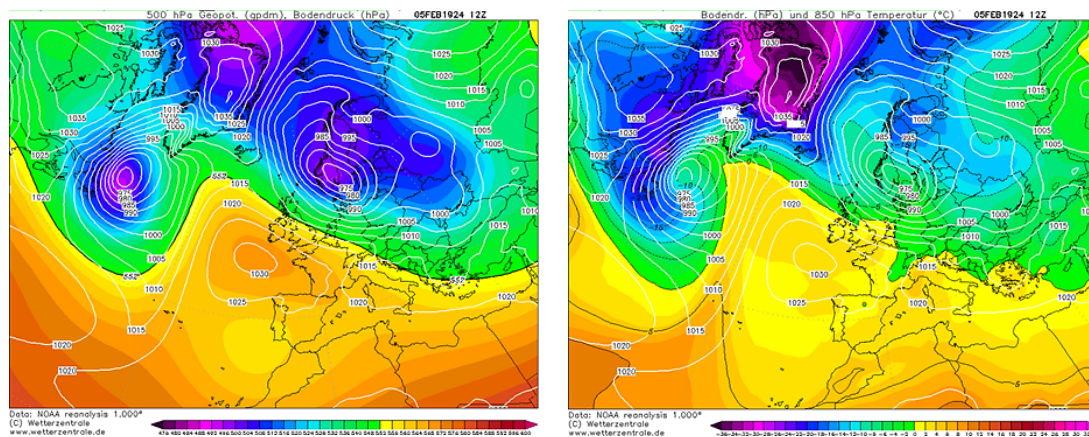
Obrázok 7. Synoptická situácia zo 4. februára 1924 vo výškovej hladine 500 hPa (vľavo), biele izočiarey sú tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (hPa), farebná škála predstavuje geopotenciálnu výšku hladiny 500 hPa, vpravo je teplota vzduchu v hladine 850 hPa o 12 UTC (Zdroj: NOAA/-CIRES/DOE).

Figure 7. Synoptic situation of February 4th 1924 at 500 hPa level (left), white isolines represent air pressure converted to sea level (hPa), color scale represents geopotential height at 500 hPa level, right is air temperature at 850 hPa level at 12 UTC.



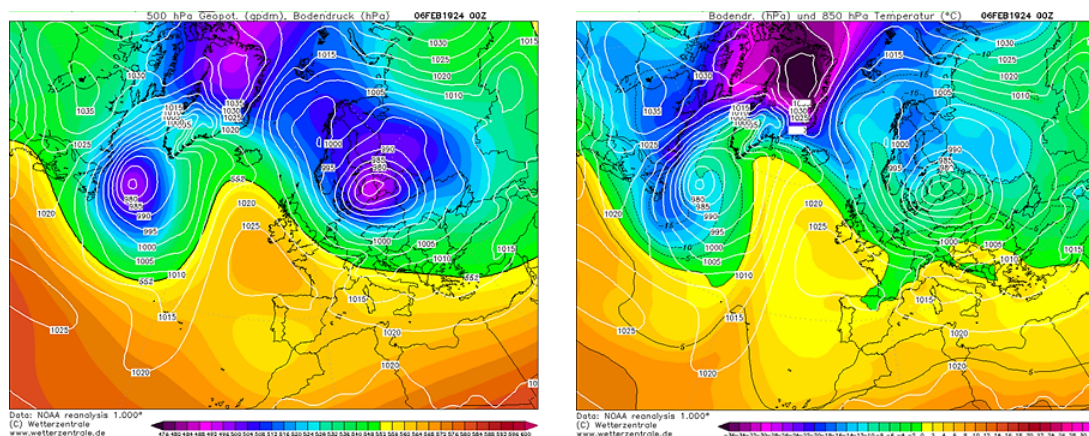
Obrázok 8. Synoptická situácia z 5. februára 1924 vo výškovej hladine 500 hPa (vľavo), biele izočiarly sú tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (hPa), farebná škála predstavuje geopotenciálnu výšku hladiny 500 hPa, vpravo je teplota vzduchu v hladine 850 hPa o 12 UTC (Zdroj: NOAA-CIRES/DOE).

Figure 8. Synoptic situation of February 5th 1924 at 500 hPa level (left), white isolines represent air pressure converted to sea level (hPa), color scale represents geopotential height at 500 hPa level, right is air temperature at 850 hPa level at 12 UTC.



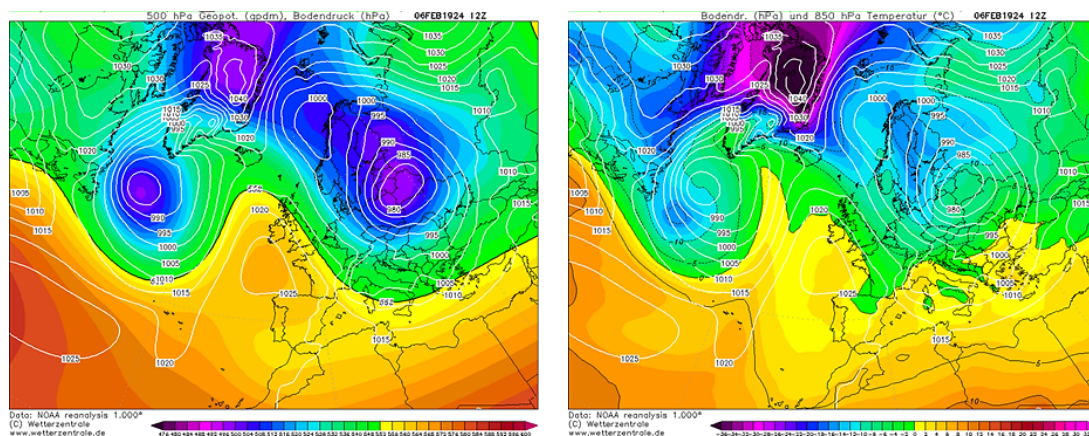
Obrázok 9. Synoptická situácia zo 6. februára 1924 vo výškovej hladine 500 hPa (vľavo), biele izočiarly sú tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (hPa), farebná škála predstavuje geopotenciálnu výšku hladiny 500 hPa, vpravo je teplota vzduchu v hladine 850 hPa o 00 UTC (Zdroj: NOAA-CIRES/DOE).

Figure 9. Synoptic situation of February 6th 1924 at 500 hPa level (left), white isolines represent air pressure converted to sea level (hPa), color scale represents geopotential height at 500 hPa level, right is air temperature at 850 hPa level at 00 UTC.



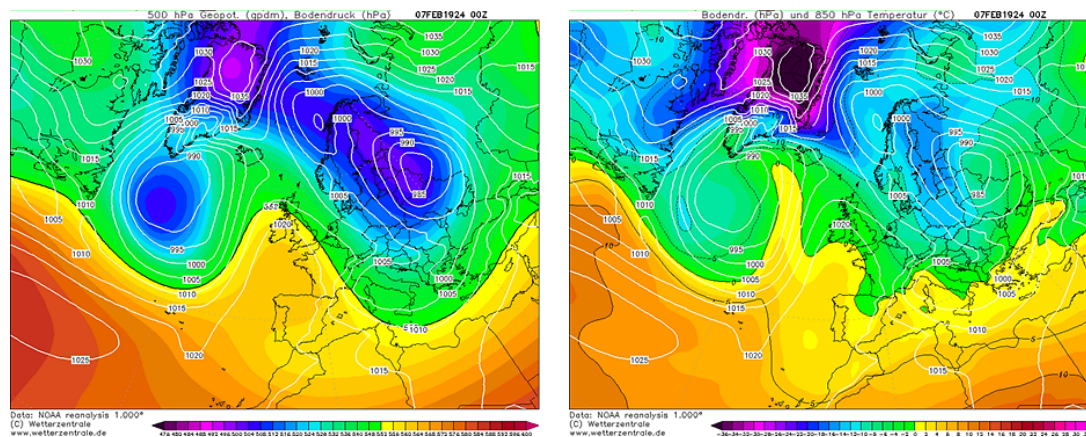
Obrázok 10. Synoptická situácia zo 6. februára 1924 vo výškovej hladine 500 hPa (vľavo), biele izočiarly sú tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (hPa), farebná škála predstavuje geopotenciálnu výšku hladiny 500 hPa, vpravo je teplota vzduchu v hladine 850 hPa o 12 UTC (Zdroj: NOAA-CIRES/DOE).

Figure 10. Synoptic situation of February 6th 1924 at 500 hPa level (left), white isolines represent air pressure converted to sea level (hPa), color scale represents geopotential height at 500 hPa level, right is air temperature at 850 hPa level at 12 UTC.



Obrázok 11. Synoptická situácia zo 7. februára 1924 vo výškovej hladine 500 hPa (vľavo), biele izočiarly sú tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (hPa), farebná škála predstavuje geopotenciálnu výšku hladiny 500 hPa, vpravo je teplota vzduchu v hladine 850 hPa o 00 UTC (Zdroj: NOAA/-CIRES/DOE).

Figure 11. Synoptic situation of February 7th 1924 at 500 hPa level (left), white isolines represent air pressure converted to sea level (hPa), color scale represents geopotential height at 500 hPa level, right is air temperature at 850 hPa level at 00 UTC.



V druhý februárový deň roku 1924 bolo zrána skoro jasno (2/10), postupne popoludní oblačno (7/10 pokrytia oblohy oblakmi). Mrazy boli o niečo miernejšie. V ranných hodinách sa teplota vzduchu v Starých Horách pohybovala okolo -8°C , popoludní vystúpila na -5°C , večer opäť klesla na -7°C . Počas dňa prevládala slabý, prevažne severný vietor. Výška snehovej pokrývky sa udržiavala na rovnakej úrovni, aj keď bolo zaznamenané veľmi slabé sneženie v prvé dva februárové dni.

Tretí február 1924 priniesol zmenu v počasi. Po celý deň bolo takmer zamračené (8/10 pokrytia oblohy oblakmi), teplota vzduchu sa v oblasti Starých Hôr udržiavala okolo -1°C , popoludní a na večer sa mierne oteplilo na $+1^{\circ}\text{C}$. Po celý deň vial mierny, až dosť čerstvý premenlivý vietor s priemernou rýchlosťou do 30 km/h. Atmosférické zrážky sa vyskytli počas celého dňa vo forme dažďa a sneženia s celkovým denným úhrnom 23,4 mm. Celková výška snehovej pokrývky bola nezmenená - 59 cm. Na horách ustavične snežilo (K-P, 1924). Počas celého dňa bola zaznamenaná silná hmla s dohľadnosťou 50 až 200 m. Podobný charakter počasia pokračoval so silnejúcim vetrom aj v nasledujúce dni.

Dňa 5. až 6. februára 1924 sa tlaková níž presunula z Nórskeho mora nad Pobaltie a prehĺbila sa až na približne 970 hPa. S ňou bol spojený frontálny systém, ktorého teplý front zasiahol predmetnú oblasť pravdepodobne 5. februára 1924. Zamračené, teplota vzduchu v rozpätí 0 až -5°C , výdatné zmiešané zrážky, silný vietor západného a severozápadného smeru s priemernou rýchlosťou 50 km/h, hmla, vysoko zvrátený sneh, fujavica boli zaznamenané 4., 5., aj 6. februára 1924. Výška snehovej pokrývky narástla 5. februára o 6 cm nového snehu, 6. februára o ďalších 7 cm. Ráno 6. februára o 7:00 hodine dosiahla v Starých Horách výška celkovej snehovej pokrývky až 72 cm.

Vzhľadom na to, že osada Rybô leží vo vyššej nadmorskej výške (cca 710 m n. m.) ako obec Staré Hory (472 m n. m.), kde sa nachádzala naša klimatologická stanica, môžeme predpokladať, že teplota vzduchu sa v Hornojeleneckej doline pohybovala od 1. do 6. februára 1924

v záporných hodnotách. Atmosférické zrážky v nadmorskej výške nad 700 m sa vyskytovali len vo forme sneženia, pričom výška celkovej snehovej pokrývky mohla v doline dosiahnuť aj 100 cm. Na záveterných svahoch v priestore hrebeňa Krížnej však mohla výška snehovej pokrývky dňa 6. februára 1924 dosiahnuť aj výrazne viac ako 100 cm (v určitých častiach aj pár metrov), čomu zodpovedajú aj zaznamenané údaje o snehovej pokrývke z iných vyššie položených klimatologických a zrážkomerných staníc. Pozorovania výšky snehovej pokrývky vo vrcholových stanicach je problematické kvôli sfúkavaniu snehu a veľkej priestorovej variabilite. Aj keď by sme odhadli výšku nového snehu v odtrhovom pásme tragickej lavíny, tak na odhad výšky odtrhu by sme potrebovali údaje o štruktúre snehovej pokrývky alebo viac meteorologických údajov, spoň na jej hrubé modelovanie. Nie vždy sa totiž v lavíne odtrhne celá vrstva nového snehu. Zdá sa, že v tomto prípade je lepšie použiť na odhad výšky odtrhu simulačné modely na základe známeho dosahu lavíny. V každom prípade, v kritickú noc bolo k dispozícii extrémne množstvo snehu (Vojtek, 2015).

Očítý svedok Tobias Stermann (Strmeň) v dobovej tlači (K-P, 1924) uvádza, že v osade Rybô 6. februára 1924 večer o pol jedenástej „vonku zúril orkán“ a potom, čo mu lavína/tlaková vlna vzala strechu z drevenice a vybehol von, tak ho „náráz vetra odhodil späť, že spadol na manželku“ a „počas víchrice sa mohli sotva doplaziť k najbližším domom“. Podľa Beaufortovej stupnice môžeme priemernú rýchlosť vetra na základe uvedených účinkov odhadnúť na 60–80 km/h, čo zodpovedá 8. až 9. stupňu Beaufortovej stupnici sily vetra. V súčasnosti zaužívané slovné pomenovanie 12. stupňa Beaufortovej stupnice - orkán - by spôsobil rozsiahle škody na stavbách a lesoch aj bez pádu lavíny, preto v tomto kontexte pojem „orkán“ je potrebné považovať za laicky nepresný.

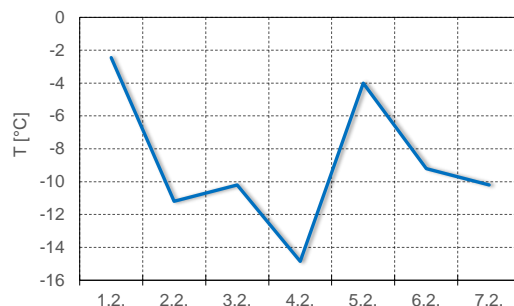
Na meteorologickej stanici Lysá Hora v nadmorskej výške 1 322 m n. m. bola 5. februára v klimatickom termíne o 14-tej hodine miestneho času nameraná teplota -4°C , čo je oteplenie v porovnaní s rovnakým termínom pred-

chádzajúceho dňa o takmer 11 °C (Obr. 12). Studený front frontálneho systému spojený s uvedenou tlakovou nížou zasiahol záujmové územie pravdepodobne už nad ránom 6. februára 1924. Na Lysej Hore poklesla teplota 6. februára o 14-tej hodine na -9,2 °C. Vzhľadom na vývoj poveternostnej situácie a historických klimatologických záznamov môžeme konštatovať, že po prechodnom krátkom oteplení prišlo opäť k ochladeniu, sneženiu a silnému vetru na hrebeni pohoria, ktorý ukladal ďalší sneh do zavesenia na východné svahy pod hlavným hrebeňom Veľkej Fatry.

Vplyvom prevládajúcej severozápadnej cyklonálnej situácie napadlo (aj účinkom orografického efektu) na severozápadných náveterných, ale i zúveterných svahoch pohorí veľa snehu. Tento efekt bol zaznamenaný na hrebeni Veľkej Fatry a tiež v oblasti vrchu Krížna, kde za 4 dni napadlo okolo 60 cm čerstvého snehu (Obr. 13).

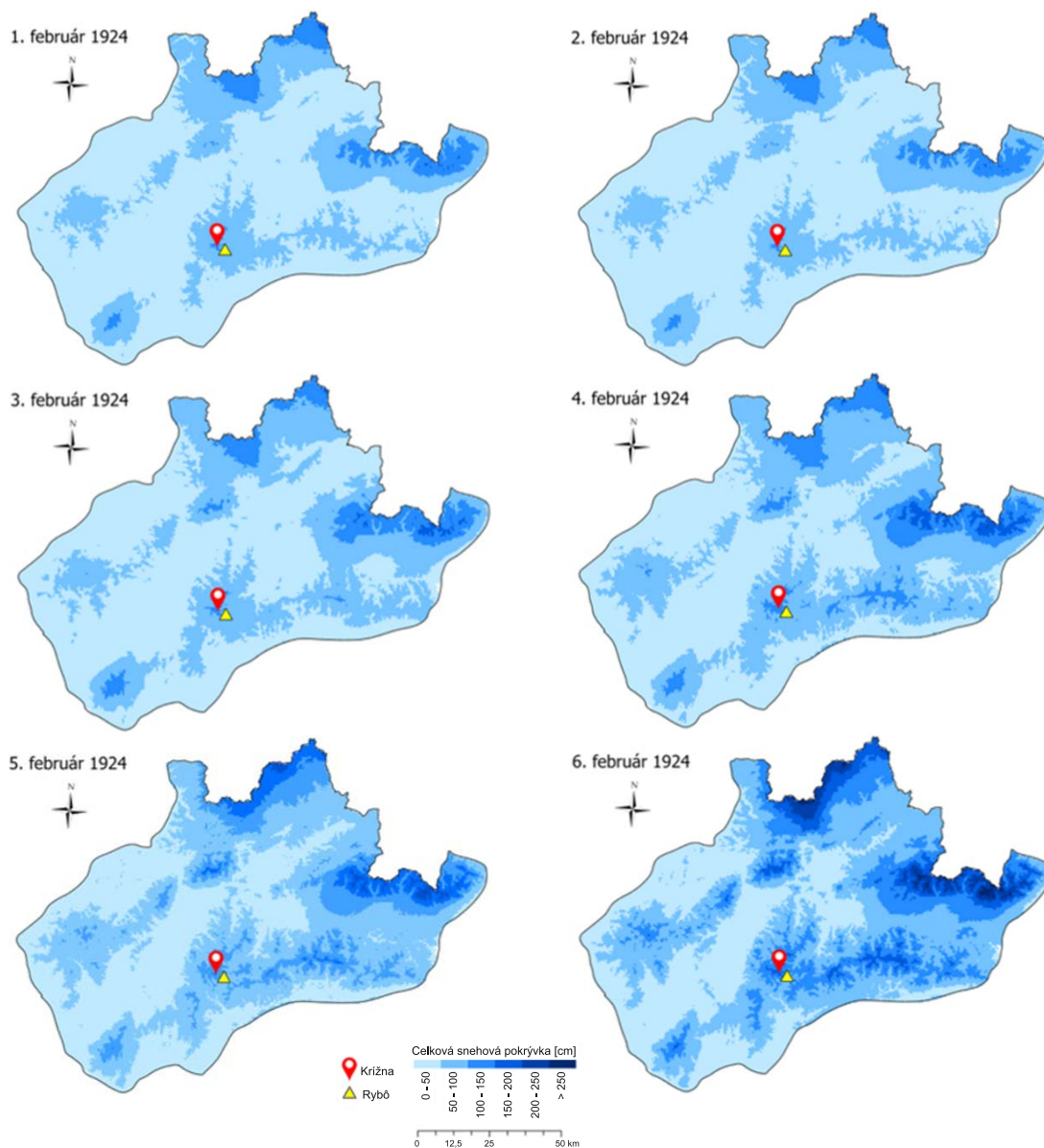
Obrázok 12. Graf teploty vzduchu o 14-tej hodine na meteorologickej stanici Lysá Hora (nadmorská výška 1 322 m n. m.) v období 1. až 7. februára 1924.

Figure 12. Graph of air temperature at 2 p.m. at the meteorological station Lysá Hora (altitude 1,322 m above sea level) in the period from February 1st to 7th 1924.



Obrázok 13. Vývoj celkovej snehovej pokrývky v analyzovanej oblasti od 1. do 6. februára 1924.

Figure 13. Development of the total snow cover in the analysed area from February 1st to 6th 1924.



Kvôli rozširovaniu pasienkov pre chov dobytku boli v minulosti odlesnené strmé svahy Krížnej. Vďaka tomu bol sneh ľahko zanášaný severozápadným vetrom na záveternú stranu pohorí. Na východných svahoch sa tak vytvárali vhodné podmienky pre vysokú snehovú pokrývku. Výrazne znížená drsnosť povrchu odlesnením týchto svahov tak nedokázala efektívne zadržať masy snehu. Teplota vzduchu na úrovni 850 hPa bola od 2. do 5. februára pod bodom mrazu. Ďalším spúšťacím faktorom lavíny, spolu s hustým snežením, bolo prechodné oteplenie, ktoré v odtrhovom pásme destabilizovalo snehovú pokrývku, keďže tenkú vrstvu ľahkého prašanu prikryl ťažší, vetrom ubitý sneh. Následne 6. februára 1924 prešiel nadránom studený front a opäť snežilo, fúkalo a ochladilo sa.

ZÁVER

Hlavnou meteorologickou príčinou extrémne veľkej lavíny s tragickými účinkami bolo intenzívne sneženie spojené so západným až severozápadným vetrom, ktorý previeval sneh do odtrhového pásma s prevažne východnou expozíciou, kde sa už predtým akumulovala nadpriemerná výška snehovej pokrývky. Svoju úlohu zohral pravdepodobne aj prechod teplého frontu s výdatným snežením a krátkodobé výrazné oteplenie dňa 5. februára 1924. Podporný efekt k pádu lavíny vytvorilo odlesnenie svahov súvisiace s hospodárskou aktivitou tamojšieho obyvateľstva. Podľa dobových periodík išlo o rok „veľmi bohatý na lavíny“ aj v Tatrách, pričom najväčšia z nich zničila porasty pod Ealiovým sedlom v šírke 4 km (T&A, 1924; K-P, 1924).

LITERATÚRA

- Bukovčan, V., 1960, *Lavíny a lesy*, Slovenské vydavateľstvo pôdohospodárskej literatúry, Bratislava.
- Slivinski, L.C.–Compo, G.P.–Whitaker, J.S.–Sardeshmukh, P.D.–Giese, B.S.–McColl, C.–Allan, R.–Yin, X.–Vose, R.–Titchner, H.–Kennedy, J.–Spencer, L.J.–Ashcroft, L.–Brönnimann, S.–Brunet, M.–Camuffo, D.–Cornes, R.–Cram, T.A.–Crouthamel, R.–Domínguez-Castro, F.–Freeman, J.E.–Gergis, J.–Hawkins, E.–Jones, P.D.–Jourdain, S.–Kaplan, A.–Kubota, H.–Blancq, F. Le–Lee, T.C.–Lorrey, A.–Luterbacher, J.–Maugeri, M.–Mock, C.J.–Moore, G.W.K.–Przybylak, R.–Pudmenzky, C.–Reason, C.–Slonosky, V.C.–Smith, C.A.–Tinz, B.–Trewin, B.–Valente, M.A.–Wang, X.L.–Wilkinson, C.–Wood, K.–Wyszyński, P., 2019, *Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system*, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 145, 2876–2908, <https://doi.org/10.1002/qj.3598>.
In: www.wetterzentrale.de
- Ivaňáková, G.–Faško, P.–Pecho, J., 2022, *Počasie ako ho nepoznáš*, Vydavateľstvo TATRAN, ISBN 9788022212212, 208 strán.
- K-P, 1924, *Grosse Lawinenstürze. Karpathen-Post 45, (1. Maerz 1924), Iss.24/p.2.*
- T&A, 1924, *Nagy lavinaomlások a Tátrában. Turistaság és alpinizmus 14, 3–6/64.*
- Vojtek, M., 2015, *Meteorologické podmienky vedúce ku zasypaniu osady Rybô lavinou dňa 6. 2. 1924. In: Milan Longauer – Martin Bartík – Jaroslav Škvarenina: 90. výročie pádu najtragickejšej lavíny na slovensku, Rybô, Veľká Fatra.*
<http://www.difmoe.eu/archiv/periodika?content=Periodika>
<https://skitourguru.com/clanek/332-ryb-najtragickejsia-lavina-na-slovensku>

DOPAD IMPLEMENTÁCIE IPCC REFINEMENT Z ROKU 2019 NA EMISIE NA SLOVENSKU

JANKA SZEMESOVÁ, KRISTÍNA TONHAUZER, JÁN HORVÁTH

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava,
janka.szemesova@shmu.sk, kristina.tonhauzer@shmu.sk, jan.horvath@shmu.sk

The aim of the paper is to present the results of the comparison of the emission inventory for individual economic sectors and emission categories according to the methodological guidelines 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories and its comparison with the emission inventory prepared according to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. The comparison was made on the basis of the project financed from the OPKŽP funds "Preparation of methodologies and improvement of emission inventories and emission projections" with the project code ITMS2014+: 310011CLD8 (hereinafter "EMISIE project") and projections with international rules and decisions of the Executive Bodies of the UNFCCC and in accordance with the new transparency framework agreed at the 21st Conference of Parties to the UNFCCC at the Climate Conference in Paris in 2015. The results were processed in the MESAP software and are of great benefit for Slovakia. The results will bring an overall improvement in the quality of emission inventories in accordance with the needs set by UN principles, namely transparency, accuracy, consistency, comparability and completeness.

Cieľom príspevku je predstavenie výsledkov porovnania emisnej inventúry pre jednotlivé ekonomické sektory a emisné kategórie podľa metodologickej príručky 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories a jej porovnanie s emisnou inventúrou vypracovanou podľa 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Porovnanie bolo spracované na základe projektu financovaného z prostriedkov OPKŽP „Príprava metodík a skvalitnenie emisných inventúr a projekcií emisií“ s kódom projektu ITMS2014+: 310011CLD8 (ďalej „projekt EMISIE“) a projekcie s medzinárodnými pravidlami a rozhodnutiami Výkonných orgánov UNFCCC a v súlade s novým rámcom transparentnosti odsúhlaseným na 21. Konferencii zúčastnených strán UNFCCC na výročnej konferencii v Paríži v roku 2015. Výsledky boli spracované v softvare MESAP a sú pre Slovensko veľkým prínosom. Výsledky prinesú celkové skvalitnenie emisných inventúr v súlade s potrebami kladenými na princípy OSN, a to sú transparentnosť, presnosť, konzistentnosť, porovnateľnosť a kompletnosť.

Key words: emission inventory, emission projections, United Nations Framework Convention on Climate Change, project EMISIE

1 ÚVOD

Projekt týkajúci sa prípravy nových metodík a výpočtových príručiek pre prípravu emisných inventúr a projekcií emisií skleníkových plynov pod názvom EMISIE zabezpečí harmonizáciu Národného systému pre emisie a projekcie s medzinárodnými pravidlami a rozhodnutiami Výkonných orgánov Rámcového dohovoru OSN o zmene klímy (ďalej „UNFCCC“) a v súlade s novým Rozšíreným rámcom transparentnosti (ďalej „ETF“ = Enhance Transparency Framework) odsúhlaseným na 21. Konferencii zúčastnených strán UNFCCC (ďalej „COP 21“) v Paríži v roku 2015. Závazný, podpísaný výstup z COP 21, ktorý bol následne ratifikovaný nadpolovičnou väčšinou zúčastnených strán UNFCCC, je známy pod názvom Parížska dohoda (ďalej „PA“).

Projekt EMISIE integruje aj emisie a projekcie emisií znečisťujúcich látok do ovzdušia a zjednotil metodické postupy pre jednotlivé ekonomické sektory a emisné kategórie. Na tento účel slúžilo aj obstaranie nového databázového systému MESAP (komerčne dostupného) pre sektorových expertov, manažéra kvality a koordinátorov inventúr a reportovacích expertov, ktorý má funkciu aj archivačného prostredia a posúva systém bilancovania a reportovania emisií na vyššiu, modernú a bezpečnejšiu úroveň.

V súvislosti s ukončením platnosti Kjótskeho protokolu po roku 2020 a ratifikáciou PA a následnou úpravou Európskej legislatívy v tejto oblasti vznikli nové požiadavky a výzvy na plnenie úloh NIS SR. Jednou z nich je aj zosúladienie inštitucionálneho a vecného plnenia NIS SR s novými pravidlami stanovenými po roku 2015 určenými na implementáciu do konca roku 2023 a prvým reportovaním Dvojročnej správy o transparentnosti ku koncu roka 2024 (ďalej „BTR“).

2 POPIS SYSTÉMU

2.1 Historické súvislosti

Jednou zo základných povinností daných Kjótskym protokolom (článok 5, odsek 1) bolo vytvoriť a v súlade s aktuálnymi požiadavkami rozvíjať národné inventarizačné systémy pre pravidelné sledovanie a reportovanie emisií skleníkových plynov a ostatné relevantné informácie súvisiace so zmenou klímy. Slovenská republika na túto povinnosť reagovala vytvorením NIS SR v roku 2007 ako súčasť Odboru emisie a biopalív na Slovenskom hydrometeorologickom ústave (ďalej „SHMÚ - OEaB“).

Kjótsky protokol bol schválený na konferencii zúčastnených strán UNFCCC v roku 2005, následne bol ratifikovaný nadpolovičnou väčšinou strán dohovoru a vstúpil do platnosti v roku 2007. Jeho prvé záväzné obdobie trvalo od roku 2008 do roku 2012. Cieľom bolo zníženie celkových emisií skleníkových plynov v tomto období o 8 %.

Následne bola platnosť Kjótskeho protokolu predĺžená dodatkom z Katarskej Dauha až do roku 2020. Jeho platnosť vypršala ku koncu roka 2020. Druhé záväzné obdobie stanovené dodatkom skončilo v roku 2020 a malo za cieľ redukovať emisie skleníkových plynov o ďalších 20 % oproti roku 1990. Keďže dodatok ratifikovalo málo zmluvných strán, toto zníženie emisií nemalo významný efekt na priebeh zmeny klímy.

Reakciu na slabú vymožitelnosť a rozporuplný medzinárodný konsenzus súvisiaci s kontroverzným dodatkom ku Kjótskemu protokolu z Dauha bola na 21. Konferencii zúčastnených strán UNFCCC (ďalej „COP 21“) v Paríži v roku 2015 odsúhlasená *Parížska dohoda* (ďalej „PA“).

V agende PA podľa článku 13 a podľa paragrafov 84–98 rozhodnutia 1/CP.21 zaoberajúcimi sa hlavne nastavením povinností zúčastnených strán podávať pravidelné správy a zverejňovať informácie o svojich emisiách, ako aj metodickými usmerneniami pre plnenie svojich záväzkov, nastali úpravy metodických a inštitucionálnych funkcií národných systémov pre emisie a projekcie. Rozhodnutie 1/CP.21 obsahuje podrobný popis metód, procedúr a usmernení pre rámec transparentnosti a pre akcie a podporu (ďalej „MPG“). Príloha rozhodnutia obsahuje aj metódy pre započítavanie finančných zdrojov poskytnutých a mobilizovaných v súlade s čl. 9, ods. 7 Parížskej dohody. Ďalej boli v rozhodnutí 19/CMP.1 stanovené usmernenia pre národné systémy s cieľom zabezpečiť pravidlá týkajúce sa inventarizačných systémov pre reportovanie údajov o emisiách, projekciách, indikátoroch a politikách a opatreniach v oblasti zmeny klímy.

Ďalším významným míľnikom pri transformácii národných inventarizačných systémov na nový režim pod PA bola, v decembri 2018, 24. celosvetová klimatická konferencia COP 24 k UNFCCC, ktorá sa konala v poľských Katoviciach. Konferencia v Katoviciach bola prelomovým stretnutím pre implementáciu PA a pre napĺňanie jej cieľov s ambíciou obmedzenia zvyšovania globálnej teploty na 1,5 °C v porovnaní s pred-industriálnou úrovňou. Cieľom konferencie bolo prijatie súboru pravidiel pre implementáciu PA tzv. „Rulebook“, ktoré potvrdili medzinárodný záväzok v boji proti zmene klímy. Experti SHMÚ - OEaB okrem mnohých iných odborných podujatí sledovali agendu článku 13 Parížskej dohody a paragrafov 84–98, rozhodnutie 1/CP.21 zaoberajúce sa reportingovými povinnosťami zúčastnených strán a metodickými usmerneniami pre reportovanie plnenia svojich záväzkov.

2.2 Súčasný stav

Do hladkého priebehu implementácie PA do medzinárodných pravidiel záväzných naprieč všetkými zúčastnenými stranami UNFCCC zasiahla pandémia COVID-19 a s ňou aj sťaženie vyjednávacích procesov. Preložená konferencia COP 26, ktorá sa mala konať v roku 2020 v Glasgowe,

sa presunula na koniec roka 2021. Na konferencii sa dokončilo schvaľovanie pravidiel pre ETF zakotvené v MPG ako súčasť rozhodnutia 1/CP.21 a nakoniec aj celého článku 13 PA. Pravidlá zmenili celkové funkcie a procesy, ktoré sa dejú v rámci inštitucionalizovaných národných inventarizačných systémov zúčastnených strán v súčasnosti. Pravidlá pre ETF dané v MPG vstúpili do platnosti od 1. januára 2023, odkedy prebieha fáza implementácie až do 31. decembra 2024, kedy je očakávaná prvá submisia Dvojročnej správy o transparentnosti pod PA. COP27 v Egyptskom Sharm el-Sheikh sa venoval hlavne implementácii MPG v oblasti vedenia dobrovoľných preskúmaní adaptačných opatrení nezávislými tímami expertov OSN, pomoci najmenej rozvinutých krajín a zvyšovaniu odbornej úrovne expertov formou budovania kapacít. COP28, ktorý sa konal začiatkom decembra 2023 v Dubaji, sa venoval praktickým prípravám pre ľahký prechod zo systému monitorovania, reportovania a overovania (ďalej „MRV“) na systém ETF, a to aj pomocou nového reportovacieho softvéru pre emisné informácie. Nový ETF softvér bude mať tri časti, ktoré budú obsahovať tabuľky pre emisie, projekcie emisií, politiky a opatrenia, zahraničnú pomoc a financie pre podporu opatrení na zmiernenie dôsledkov zmeny klímy.

SHMÚ - OEaB od roku 2022 pracuje na príprave nového národného systému ako súčasť širšej agendy v oblasti zmeny klímy. V minulom volebnom období sa rozbehli prípravy nového zákona o zmene klímy, ktorý mal ukotviť legitímnosť inventarizačného systému pod novým názvom Národný systém pre nahlasovanie údajov o zmene klímy Slovenskej republiky (ďalej „NSZK SR“). Schvaľovanie zákona sa vplyvom predčasných volieb zastavilo a čaká sa na rozhodnutie súčasného vedenia ministerstva.

Okrem legislatívnych, inštitucionálnych a procesných funkcií NSZK SR je proces transformácie komplikovaný vo vzťahu k metodickým, validačným a reportovacím procesom, ktoré je potrebné upraviť a následne nastaviť aj z hľadiska toku financií, alokácie vhodných a dostatočných kapacít a zabezpečenie bezproblémového prechodu z pôvodného systému na nový systém.

Jednou z povinností je zabezpečiť implementáciu nových metodických príručiek pre stanovenie emisií skleníkových plynov. Do konca roka 2022 sa používali záväzné metodické príručky *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory*. Tie sa nahradili od roku 2023 novými metodickými príručkami *2019 IPCC Refinement*. Okrem toho došlo aj k zmene globálnych potenciálov otepľovania pre jednotlivé skleníkové plyny (*Piata hodnotiacia správa IPCC, 2014*).

3 PROJEKT EMISIE

Informácie opísané v Kapitole 2 majú za následok zvýšený nárok na kapacity (odborné, finančné, časové) pre expertov a spolupracovníkov SHMÚ - OEaB. Ich úlohou je nastaviť systém reportovania emisných informácií tak, aby bol zabezpečený hladký prechod na režim ETF pod PA. Zvýšené nároky na kapacity bolo nemožné pokryť v rámci bežných rozpočtových možností rezortu ministerstva

životného prostredia, a z toho dôvodu bolo potrebné riešiť úlohy spojené s transformáciou národného systému pre emisie a projekcie emisií formou nenávratného finančného príspevku v rámci OPKŽP pomocou projektu EMISIE.

Z analýzy, ktorú si dala vypracovať Európska komisia v rámci projektu zameraného na implikácie prechodu na nové 2019 IPCC Refinement metodické príručky, ako aj na samotné MPG vyplynulo, že Slovenská republika bude mať až 25 % svojich emisií skleníkových plynov v ohrození – zmenia sa (zvýšia alebo znížia), čo je jedno z najvyšších percent v rámci EÚ ČŠ. Táto skutočnosť má samozrejme dopad na rôzne iné mechanizmy, štúdie, metodiky a ovplyvňuje aj plánovanie opatrení v iných rezortoch. K rovnakým záverom prišla aj Medzinárodná energetická agentúra pri nedávnom audite na ministerstve hospodárstva. Správa sa ešte pripomienkuje a k termínu tohto príspevku nebola zverejnená.

Z vyššie uvedeného dôvodu bolo logickým cieľom projektu EMISIE vyhodnotiť a identifikovať percentuálny podiel emisií skleníkových plynov v ohrození, transformovať súčasný inštitucionálny a odborný národný inventarizačný systém na systém spĺňajúci požiadavky rozšíreného rámca transparentnosti Parížskej dohody a MPG a skvalitniť emisné inventúry skleníkových plynov. Na dosiahnutie týchto cieľov bolo potrebné inovovať aj softvérové a hardvérové vybavenie expertov inventarizačných tímov v súlade s potrebami kladenými na princípy OSN, a to sú transparentnosť, presnosť, konzistentnosť, porovnateľnosť a kompletnosť.

Na splnenie uvedených cieľov boli pripravené čiastkové správy, ktorých výstupy sa budú používať v najbližších rokoch:

1. Analýza 2019 IPCC Refinement metodických príručiek z pohľadu relevantných zmien korešpondujúcich s národnými špecifikami.
2. Príprava nových metodických postupov vychádzajúcich z analýzy 2019 IPCC Refinement metodických príručiek.
3. Príprava emisných inventúr skleníkových plynov na základe nových metodických postupov daných v 2019 IPCC Refinement metodických príručkách.
4. Porovnanie emisných inventúr v rámci sledovaných emisií skleníkových plynov vypracovaných podľa 2006 IPCC Guidelines a podľa 2019 IPCC Refinement metodických príručiek.
5. Harmonizácia nových metodických postupov vypracovaných na základe 2019 IPCC Refinement metodických príručiek s emisnou inventúrou znečisťujúcich látok.
6. Skvalitnenie a prepočítanie časových radov emisií skleníkových plynov a znečisťujúcich látok za časový rad minimálne od roku 2005, optimálne od roku 1990.
7. Príprava aktualizovaných projekcií emisií skleníkových plynov a znečisťujúcich látok na základe prepočítaných časových radov do roku 2050.
8. Implementácia softvéru na bilancie emisií, reportovanie a archiváciu.

Všetky uvedené správy boli vypracované v rozsahu pokrývajúcim predpísané metodické postupy v nasledujúcom členení podľa hlavných sektorov a kategórií IPCC:

- Energetika – stacionárne spaľovanie palív
- Energetika – mobilné spaľovanie palív (doprava)
- Energetika – fugitívne emisie z palív
- Priemyselné procesy – výroba a technológia
- Priemyselné procesy – používanie rozpúšťadiel a výrobkov
- Priemyselné procesy – fugitívne emisie z fluórovaných plynov
- Poľnohospodárstvo
- Využívanie krajiny, zmeny vo využívaní krajiny a lesníctvo (LULUCF)
- Odpadové hospodárstvo – skládky odpadov
- Odpadové hospodárstvo – odpadové vody

4. VÝSTUPY PROJEKTU EMISIE

4.1 Metodiky podľa 2019 IPCC Refinement

Celkové antropogénne emisie skleníkových plynov Slovenskej republiky za rok 2021 predstavovali 41 226 Gg CO₂ ekvivalentov bez započítania záchytov zo sektoru LULUCF a bez započítania nepriamych emisií z priemyselných rozpúšťadiel a poľnohospodárstva.

V Tab. 1 sú zosumarizované všeobecné kľúčové zmeny pri prechode na metodiku 2019 IPCC Refinement, kde sa budú implementovať nové hodnoty potenciálov globálneho otepľovania (ďalej „GWP“). Aplikáciou GWP z Piatej hodnotiacej správy IPCC (ďalej „AR5“) na non-CO₂ emisie, kde narastie GWP z 25 na 28 v prípade metánu, resp. poklesne z 298 na 265 v prípade oxidu dusného, nastanú zmeny v každom z hodnotených sektorov. Pôvodne boli používané GWP zo Štvrtej hodnotiacej správy IPCC (ďalej „AR4“).

Tabuľka 1. Porovnanie globálnych potenciálov otepľovania medzi Štvrtou a Piatou hodnotiacou správou IPCC a ich použitie v 2006 IPCC Guidelines a 2019 IPCC Refinement.

Table 1. Comparison of the Global Warming Potentials between the Fourth and the Fifth IPCC Assessment Reports and their implementation in 2006 IPCC Guidelines and 2019 IPCC Refinement.

Plyn	AR4	AR5
CO ₂	1	1
CH ₄	25	28
N ₂ O	298	265

4.1.1 Porovnanie emisií skleníkových plynov za sektor Energetika

Sektor energetika pokrýva emisie zo spaľovania fosílnych palív (CRF 1.A) a fugitívne emisie z ťažby ropy, transformácie palív a zemného plynu (CRF 1.B, vid' nižšie). Inventarizácia emisií zo spaľovania palív zahŕňa priame emisie skleníkových plynov (CO₂, CH₄, N₂O) a nepriame emisie skleníkových plynov (NO_x, CO, NMVOC), ako aj emisie SO₂.

Najvýznamnejším antropogénnym zdrojom skleníkových plynov v SR je spaľovanie a transformácia fosílnych palív. V roku 2021 predstavoval podiel emisií skleníkových plynov zo sektora energetika 66,5 %. Z toho viac ako 98 % emisií pripadá na aktivity spojené so spaľovaním palív.

Sektor spaľovania palív v rámci CRF 1.A sa rozdeľuje do piatich všeobecných kategórií:

- 1.A.1 Energetický priemysel
- 1.A.2 Výrobný priemysel a strojárstvo
- 1.A.3 Doprava
- 1.A.4 Iné sektory
- 1.A.5 Nešpecifikované sektory

Táto štruktúra bola zachovaná prakticky bez zmeny v metodike 2019 IPCC Refinement. Výrazné zmeny v kategorizácii sektorov boli predstavené v predchádzajúcej verzii metodiky (2006 IPCC GL), v ktorej došlo k detailnejšiemu rozdeleniu vo vnútri jednotlivých kategórií. Sektor 1.A.1.a Výroba elektrickej energie a tepla bol rozdelený na tri nové podsektory a v sektore 1.A.1.c (Výroba pevných palív) vznikli dva nové podsektory. V sektore 1.A.2 (Výrobný priemysel a strojárstvo) vzniklo šesť nových kategórií, aby sa zabezpečil lepší súlad s medzinárodnou klasifikáciou. K výraznejším modifikáciám v metodike došlo aj v sektore doprava. Sektory 1.A.4 a 1.A.5 boli upravené minimálne.

Princíp výpočtu emisií skleníkových plynov je vo všetkých energetických sektoroch prakticky identický, preto bude v tejto správe analyzovaný súčasne. Výnimkou je sektor doprava, ktorý musí využívať diametrálne odlišné prístupy. Z pohľadu základného delenia IPCC metodiky sa výpočtový postup líši pre stacionárne zdroje (stacionárne spaľovanie), mobilné zdroje (doprava) a fugitívne emisie.

Spaľovanie palív v stacionárnych zdrojoch (CRF 1.A.1, 1.A.2, 1.A.4, 1.A.5)

Na základe analýzy upravenej metodiky 2019 IPCC Refinement možno konštatovať, že počet zmien v sektore spaľovania palív v stacionárnych zdrojoch je minimálny. Pri stacionárnom spaľovaní je prakticky jedinou explicitnou zmenou opis spôsobu reportovania emisií z biomasy. Je nutné upozorniť na skutočnosť, že pri analýze stacionárneho spaľovania je nevyhnutné sledovať aj sektory, ktoré sú so spaľovaním úzko prepojené (priemyselné procesy, AFOLU a odpady), a v ktorých je potrebné veľmi precízne rozdelenie emisií. Takýmto sektorom je výroba vodíka v rafinérii. V súčasnosti sa vodík vyrába parným reformingom zo zemného plynu a vyrobený vodík sa ihneď spotrebuje v rafinérii. 2019 IPCC Refinement jasným spôsobom definuje, že emisie z tohto procesu musia byť reportované v energetickom sektore v kategórii 1.A.1.b. Táto zmena nutne vyžaduje rekalkuláciu (realokáciu) celého časového radu. V dôsledku presunu emisií z priemyselného sektora do energetiky nedôjde k zmene celkových emisií, ale k zmene sektorových emisií. Rekalkuláciu v kategórii 1.A.1.b je možné vykonať pre celý časový rad bez získavania/dohľadávania dodatočných údajov a výsledky implementovať do inventúry 2024.

Spaľovanie palív v mobilných zdrojoch (CRF 1.A.3)

Napriek tomu, že sektor doprava (1.A.3) patrí ku kľúčovým sektorom v kategorizácii IPCC a prispieva takmer 20 % k celkovým emisiám skleníkových plynov, neboli pripravené pre tento sektor zlepšenia v rámci metodických príručiek 2019 IPCC Refinement. Bilancia emisií z cestnej dopravy je vykonávaná modelom COPERT (verzia 5.5.1), ktorý vyvíja spoločnosť EMISIA a je financovaný zo zdrojov Európskej environmentálnej agentúry. Tento model je zlepšovaný v pravidelných ročných cykloch (metodika výpočtu a emisné faktory). Slovensko pomocou meraní obsahu uhlíka, dusíka, kyslíka a meraniami výhrevnosti určuje národnešpecifický emisný faktor pre emisie CO₂ v palivách používaných v mobilných zdrojoch. Výnimkou je kategória 1.A.3.e - Iná doprava (potrubná doprava), ktorá je zaradená do systému obchodovania s emisnými kvótami, a teda tieto emisie sú viacnásobne merané, počítané a kontrolované.

Fugitívne emisie (CRF 1.B)

V sektore energetika došlo k výrazným zmenám pri výpočte fugitívnych emisií z baní, ťažby ropy a zemného plynu. Problémom pri príprave aktualizovanej emisnej inventúry z nových kategórií a zdrojov sú častokrát chýbajúce informácie o emisných faktoroch a vstupných (aktívnych) údajoch, napriek podrobnému popisu zdroja daných emisií. Štruktúra kategórií fugitívnych emisií bola významne zmenená a bude ju potrebné v novom reportovacom softvéri vytvoriť nanovo. Aktuálne schválené CRT tabuľky pod ETF režimom tiež nie sú úplne v súlade s novým delením kategórií podľa 2019 IPCC Refinement. Ako najvýznamnejšia zmena sa javí výrazné zvýšenie emisných faktorov pre skladovane zemného plynu v zásobníkoch. Nové emisie môžu celú kategóriu fugitívnych emisií z ťažby, prepravy a skladovania zemného plynu zmeniť na kľúčovú kategóriu a mimoriadne významnú z celkového hľadiska emisií metánu. Ďalšie zmeny sú popísané v Tab. 2.

4.1.2 Porovnanie emisií skleníkových plynov za sektor Priemyselné procesy a používanie produktov (ďalej „IPPU“)

V sektore priemyslu (CRF 2) sa bilancujú nielen emisie z technologických procesov, ale aj z používania rozpúšťadiel a výrobkov a fugitívne emisie z používania fluórovanných plynov. Vo všeobecnosti sektor priemyslu pri reportovaní emisií skleníkových plynov možno rozdeliť do ôsmich všeobecných kategórií:

- A. Výroba minerálnych produktov
- B. Chemický priemysel
- C. Výroba kovov
- D. Neenergetické produkty z palív a použitie rozpúšťadiel
- E. Elektronický priemysel
- F. Produkty používané ako náhrada ozón deštruujúcich látok
- G. Iná výroba a použitie produktov
- H. Iné

Táto štruktúra bola zachovaná aj v 2019 IPCC Refinement, pričom mierne úpravy nastali vo vnútri jednotlivých kategórií.

Emisie skleníkových plynov z tohto sektoru predstavujú približne 23 % z celkových emisií skleníkových plynov na Slovensku. Napriek fluktuáciám v celkových emisiách z tohto sektora sú v súčasnosti emisie približne rovnaké ako v roku 1990. V priebehu posledných tridsiatich rokov nastalo viacero technologických zmien vo výrobe, čím sa znížili technologické emisie skleníkových plynov. Na druhej strane sa však významne rozmohol priemysel využívajúci fluórované plyny, čo negovalo pokles technologických emisií. V súčasnosti nie je možné očakávať významnejší pokles technologických emisií bez zásadných zmien v technológiách (napr. použitie vodíka namiesto uhlíka ako redukčného činidla), pokles by mohol nastať len poklesom produkcie. Pokles emisií v tomto sektore však môžu zabezpečiť opatrenia na redukcii používania fluórovaných uhlíkovodíkov, ktoré predstavujú cca 7 % z celkových emisií v tomto sektore. Z toho vyplýva, že bez významných technologických zmien sú možnosti zníženia emisií v tomto sektore významne limitované. Ďalšie zmeny sú popísané v Tab. 3.

4.1.3 Porovnanie emisií skleníkových plynov za sektor Poľnohospodárstvo (CRF 3)

Sektor poľnohospodárstvo sa podieľa na celkových emisiách skleníkových plynov približne 6,5 %. Je to štvrtý najväčší sektor produkujúci emisie skleníkových plynov. Enterická fermentácia z hovädzieho dobytku tvorí najväčší podiel na emisiách metánu z poľnohospodárstva. V roku 2021 bolo vyprodukovaných 33,96 Gg (49 %) metánu v rámci sektora. Hlavným zdrojom emisií N₂O sú poľnohospodárske pôdy s podielom 90 %, nasleduje kategória 3.B, ktorá sa podieľa 10 % z celkových emisií N₂O.

Jedna z dôležitých zmien, ktorú prináša 2019 IPCC Refinement v kategórii 3.A Enterická fermentácia, sa týka zmeny miery konverzie metánu (Y_m faktor). Táto zmena mala dopad na celý časový rad v kategóriách 3.A.1 Hovädzí dobytok a 3.A.2 Ovce. Výber hodnôt parametra závisel od produkcie mlieka, stráviteľnosti DE % a objemu hrubej detergentnej vlákniny NDF v % v sušine. Na základe porovnania údajov možno konštatovať, že nárast emisií CH₄ je prítomný v celom časovom rade od roku 1990 a rozdiel sa pohybuje medzi hodnotami 5 až 8 %.

Tabuľka 2. Prehľad kategórií a zmien v inventúre 1.B po prechode na 2019 IPCC Refinement.

Table 2. List of categories and changes in 1.B inventory applying the 2019 IPCC Refinement.

Kategória	Plyn	Reportovanie podľa 2019 IPCC Refinement
1.B.1.a.iii Prieskum nových lokalít	CO ₂	Aktuálne nie je určený emisný faktor, ale krajiny sú vyzvané k činnosti na jeho určenie
1.B.1.c.i Výroba dreveného uhlia a biouhlia (aktívneho uhlia)	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Nové emisné faktory, CO ₂ a N ₂ O neboli reportované
1.B.1.c.ii Výroba koksu	CH ₄	Nové delenie technológií a nový emisný faktor
1.B.2.a.ii Ťažba ropy	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Zjednotenie emisných faktorov pre rôzne činnosti pri ťažbe
1.B.2.a.iv Rafinácia ropy	CH ₄ , N ₂ O	Nové emisné faktory, CH ₄ a N ₂ O neboli reportované. Emisie z CO ₂ sa reportujú v rámci procesu výroby v rafinérii a sú pokryté EU ETS.
1.B.2.a.vii Opustené ropné vrty	CH ₄	Nová emisná kategória na reportovanie
1.B.2.b.ii Ťažba zemného plynu	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Zjednotené samostatné emisné faktory pre úniky a spaľovanie
1.B.2.b.iii Spracovanie zemného plynu	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Zjednotené emisné faktory pre úniky, spaľovanie a nové rozdelenie podľa technológií spracovania
1.B.2.b.v Distribúcia zemného plynu	CO ₂ , CH ₄	Pracuje sa na novej národnej metodike na úrovni tier 3. Predstavená má byť v priebehu roka 2024
1.B.2.b.vi Úniky za meračom zemného plynu (konečné miesto spotreby)	CO ₂ , CH ₄	Nová kategória predstavená v 2019 IPCC Refinement
1.B.2.b.vii Iné	CO ₂ , CH ₄	Dôjde k mimoriadne vysokému nárastu emisií z tejto kategórie
1.B.2.b.viii Opustené vrty zemného plynu	CH ₄	Nová emisná kategória na reportovanie

Tabuľka 3. Prehľad kategórií a zmien v inventúre IPPU po prechode na 2019 IPCC Refinement.

Table 3. List of categories and changes in IPPU inventory applying the 2019 IPCC Refinement.

Kategória	Plyn	Reportovanie podľa 2019 IPCC Refinement
2.B.2 Výroba kyseliny dusičnej	N ₂ O	Zmena emisného faktoru pre atmosférickú prevádzku
2.B.10 Výroba vodíka	CO ₂	Re-alokácia emisií do energetického sektoru
2.C.1 Výroba železa a ocele	CH ₄	Použitie metodiky tier 1 pre emisie z aglomerácie a výroby koksu
2.C.1 Výroba železa a ocele	N ₂ O	Reportovanie nového plynu
2.C.3 Výroba hliníka	PFC	Zmena emisných faktorov pre tier 2 pre vysokonapäťový anódový efekt; nová metodika pre nízkonapäťový anódový efekt – použitie tier 1
2.F.1 Chladenie a klimatizácie	HFC + PFC	Zmena v re-alokácii výrobkov vo vnorených pod-kategóriách

V kategórii 3.B Hnojný manažment došlo k zmenám v parametre miera konverzie metánu (MCF faktor). Tento faktor bol vybraný na základe analýzy klimatických dát za posledných 30 rokov. Zmena ovplyvnila celý časový rad emisií v dôležitých kategóriách hospodárskych zvierat, najmä u 3.B.1.1 (hovädzi dobytok) a 3.B.1.3 (ošípané). Počas chovu týchto zvierat vzniká veľké množstvo hnojovice a počas jej skladovania sa uvoľňuje viac metánu v porovnaní s inými živočíšnymi druhmi. Parameter MCF pre skladovanie hnoja a hnojovice sa zvýšil z $10 \pm 5\%$ na $20 \pm 5\%$.

Množstvo generovaného metánu je závislé od systému hospodárenia s hnojom. Kvapalnú systémy sú citlivé na zmenu teploty. 2019 IPCC Refinement priniesol inovovaný prístup tier 1 pri neklúčových kategóriách emisií 3.B.1.4.a (kozy) a 3.B.1.4.b (kone), kde bolo potrebné odhadnúť celkovú ročnú produkciu prchavých látok z hnoja VS. Počas bilancie emisií s pôvodnou metodikou IPCC z roku 2006 sa používali iné emisné faktory, na ktorých základe sa odhadli emisie metánu. Pre kategóriu 3.B.1.4.c (hydina) bol implementovaný prístup na úrovni tier 2. Na základe údajov možno konštatovať, že nárast emisií CH₄ v kategórii 3.B je v posledných desiatich rokoch na úrovni 26 až 50 %.

V kategórii 3.B.2.5 Nepriame emisie N₂O bol do emisnej inventúry zahrnutý nový zdroj emisií N₂O z vyplavovania dusíka zo systémov skladovania hnoja a hnojovice (FracLeach). Predvolené hodnoty parametrov pre rôzne systémy hnoja a pre jednotlivé kategórie hospodárskych zvierat boli zavedené v 2019 IPCC Refinement a boli použité pri výpočte emisií oxidu dusného. V kategórii 3.D Poľnohospodárske pôdy boli revidované emisie na základe zmeny emisných faktorov. Zvolené emisné faktory pre chladné a suché klimatické pásmo boli vybrané na základe analýzy Slovenských klimatických dát za posledných 30 rokov podobne ako pri emisiách metánu z hnojného manažmentu. Táto revízia emisných faktorov viedla k zníženiu emisií oxidu dusného na jednotku hnojiva. Emisné faktory pre aplikáciu organických hnojív klesli takmer o 40 %. Emisné faktory pre pastvu dokonca klesli až o 80 %. Tieto zmeny mali významný vplyv na celkovú redukciu emisií z tohto sektora.

4.1.4 Porovnanie emisií skleníkových plynov za sektor Využívanie krajiny a zmeny vo využívaní krajiny a lesníctvo pod skratkou LULUCF (CRF 4)

Na základe inventúry emisií GHGs podanej do UNFCCC v roku 2023 vykázalo Slovensko v roku 2021 celkové záchyty v sektore LULUCF na úrovni takmer 7 658 Gg CO₂ ekv., teda viac než 18 % z celkových emisií. Historicky najnižšie záchyty CO₂ v sektore LULUCF boli zaznamenané v roku 2005, na čom sa výrazne podieľala kategória obhospodarovania lesov, v dôsledku veľkej vetrovej kalamity vo Vysokých Tatrách. Vo všeobecnosti však lesy, orná pôda a pasienky na Slovensku svojimi záchytmi kompenzujú výrazne vyšší podiel emisií CO₂ na HDP, ako je priemer EÚ.

Analýzou zmien v reportovaní skleníkových plynov v kategórii 4.A Lesy pri použití revidovaných metodických postupov a odporúčaní uvedených v 2019 IPCC Refinement bolo zistené, že aktuálne neexistujú zmeny v metodikách kvantifikácie emisií/záchytov skleníkových plynov, ktoré je

možné zapracovať do inventúry sektora LULUCF v kategórii 4.A Lesy. Potvrďuje to skutočnosť, že štruktúra podkategórií 4.A.1 Lesy zostávajúce lesmi a 4.A.2 Krajina konvertovaná na lesy zostala nezmenená a tiež, že neboli zmenené kategórie uhlíkových zásob. Taktiež neboli v rámci kategórie 4.A Lesy žiadne skleníkové plyny pridané, redukované, ani zmenené. Tiež sa nezmenila metodika na stanovenie CO₂ a ani non-CO₂ emisií skleníkových plynov (CH₄ a N₂O) vznikajúcich pri spaľovaní biomasy (zvyškov po ťažbe dreva) a pri lesných požiaroch.

Určitou zmenou v novom systéme tabuliek, ktorá síce nie je priamo uvedená v príručke 2019 IPCC Refinement, je prechod na vyšší metodický prístup (najmä tier 3), ktorý je významne uľahčený zavedením georeferencovaného systému sledovania zmien vo využívaní krajiny. Sektor LULUCF implementuje nové GWP pod AR5, tým pádom sa významne zmenia reportované emisie N₂O.

4.1.5 Porovnanie emisií skleníkových plynov za sektor Odpady – odpadové vody (CRF 5.D)

Emisie sa stanovujú v jednotlivých sektoroch podľa jednotnej klasifikácie Medzivládneho panela pre zmenu klímy (ďalej „IPCC“), pričom v rámci sektora odpadov sa bilancuje aj príspevkov odpadových vôd na celkovú bilanciu emisií skleníkových plynov. Je možné konštatovať, že emisie skleníkových plynov v sektore odpadových vôd predstavujú približne 1–2 % emisií z celkovej slovenskej bilancie. Dominantným skleníkovým plynom z odpadových vôd je metán, pričom až 90 % emisií metánu (a únikov do atmosféry) predstavujú septiky, resp. žumpy. Práve eliminácia používania žump (prípadne aj septikov) a napojenie obyvateľov Slovenska na centralizované systémy odkanalizovania a čistenia odpadových vôd predstavuje hlavný potenciál pre znížovanie produkcie skleníkových plynov (hlavne metánu) do blízkej budúcnosti.

Podobne ako v predchádzajúcich verziách výpočtových postupov aj v 2019 IPCC Guidelines sú jednotlivé kapitoly rozdelené na dve hlavné oblasti výpočtu:

- Emisie metánu z odpadových vôd
- Emisie oxidu dusného z odpadových vôd

príčom v rámci oboch výpočtových postupov sa samostatne realizujú výpočty pre:

- Odpadové vody z domácnosti
- Odpadové vody priemyslu

V oblasti tvorby emisií metánu a oxidu dusného nenastanú v kategórii odpadové vody veľmi významné zmeny ani pri metáne, ani pri oxide dusnom. Mierne zmeny (približne $\pm 10\%$) nastanú v dôsledku detailnejších výpočtov, presnejších emisných faktorov pre tvorbu týchto plynov v prostredí odpadových vôd. Tieto zmeny sú dôsledkom detailnejšieho popisu procesu tvorby metánu a oxidu dusného vo vypúšťaných odpadových vodách, čistených aj nečistených do vodných útvarov.

Možno konštatovať, že zmeny, ktoré je potrebné vykonať pre aplikovanie postupov opísaných v 2019 IPCC Refinement, sa dajú realizovať v časovom horizonte projektu bez získavania/dohľadávania dodatočných údajov. Ďalšie zmeny sú popísané v Tab. 4.

Tabuľka 4. Prehľad kategórií a zmien v inventúre odpadovej vody po prechode na 2019 IPCC Refinement.

Table 4. List of categories and changes in Wastewater inventory applying the 2019 IPCC Refinement.

Kategória	Plyn	Reportovanie podľa 2019 IPCC Refinement
5.D.1 Odpadové vody z domácností	CH ₄	Pokles emisií bude spôsobený zmenou výpočtu celkového organického odpadu (zmena parametrov a emisných faktorov). Aplikácie novej metodiky pre emisie z odvádzania vôd do vodných útvarov. Je k dispozícii historický rad potrebných údajov od roku 1990.
5.D.1 Odpadové vody z domácností	N ₂ O	Zvýšenie emisií spôsobené zahrnutím nových emisných faktorov do výpočtu. Aplikácie novej metodiky pre emisie z odvádzania vôd do vodných útvarov. Od roku 2010 sú exaktné merania dusíka v odpadových vodách k dispozícii.
5.D.2 Odpadové vody z priemyslu	CH ₄	Zvýšenie emisií spôsobené zahrnutím nových emisných faktorov do výpočtu. Aplikácie novej metodiky pre emisie z odvádzania vôd do vodných útvarov. Je k dispozícii historický rad potrebných údajov od roku 1990.
5.D.2 Odpadové vody z priemyslu	N ₂ O	Zvýšenie emisií spôsobené zahrnutím nových emisných faktorov do výpočtu. Aplikácie novej metodiky pre emisie z odvádzania vôd do vodných útvarov. Od roku 2010 sú exaktné merania dusíka v odpadových vodách k dispozícii.

4.2 Databázový systém MESAP

Databázový systém vyvinutý pod názvom MESAP v roku 2001 bol v roku 2020 upgradovaný a momentálne je na trhu jeho 3. generácia. Táto ide v kontexte Cloudového systému a architektúry spolu so silným a flexibilným dátovým modelom. Softvér MESAP dodáva nemecká spoločnosť *Sevenzone*.

Je to databázový systém s multidimenzionálnym dátovým úložiskom. Pracuje na klient/server princípe podobne ako NEIS, a tým umožňuje prácu s dátami z akéhokoľvek miesta bez nutnosti kopírovania dát. Sú podporované tri databázové platformy: MS Access, MS SQL, Oracle.

Systém konvertuje vstupy do potrebných a predpísaných foriem (jednotiek). Výpočty je možné zadefinovať a ukladať ako databázové objekty. Systém popri kalkulácii emisií počíta aj ich neurčitosti. Po nastavení úrovne kontroly systém robí automatické QA/QC kontroly. Systém archívuje všetky vstupy (aj nečíselné) a logicky ich spája podľa potreby (zdroje EF, literatúra a pod.).

Na základe vstupných údajov MESAP spracúva údaje z nasledujúcich sektorov:

- Energetika
- Doprava

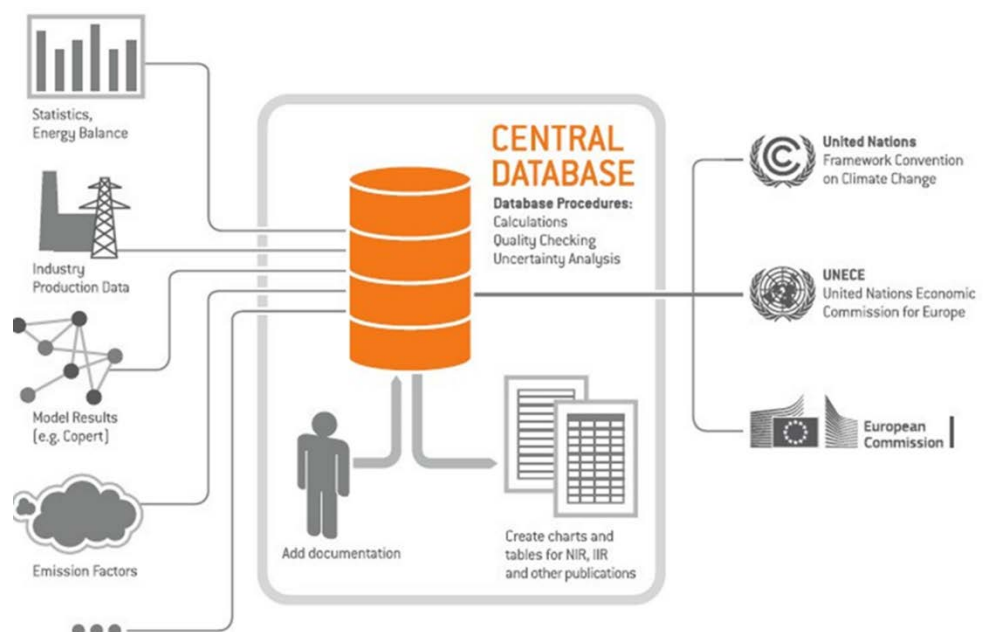
- Priemyselné procesy
- Poľnohospodárstvo
- Malé spaľovacie zariadenia
- Odpady

Systém okrem emisných inventúr vie spracovať aj projekcie a rôzne scenáre a slúži aj na analýzu energetických tokov, procesu inventarizácie a reportovania (podávanie správ) emisných inventúr znečisťujúcich látok a skleníkových plynov. Jedná sa o reportovania do medzinárodných organizácií (OSN, EHK OSN, IEA, OECD, EUROSTAT) a do Európskych štruktúr (DG CLimate Action, DG Environment), ako aj v rámci národného toku informácií pre relevantné ministerstvá, organizácie a odbornú a laickú verejnosť. Súčasťou sú reporty pod ePRTR (IPKZ), reportovanie veľkých bodových zdrojov, zariadení na spracovanie odpadov a ako trhový systém pre predajcov elektriny a reportovanie elektrární a prevádzkovateľov sietí (Obr. 1).

Softvér MESAP po jeho plnej implementácii bude obsahovať minimálne 30 rôznych plynov vrátane emisií skleníkových plynov a emisií znečisťujúcich látok z 5 sektorov podľa IPCC nomenklatúry od roku 1990 po rok X-2 (do roku 2022 celkovo 31 rokov emisných inventúr).

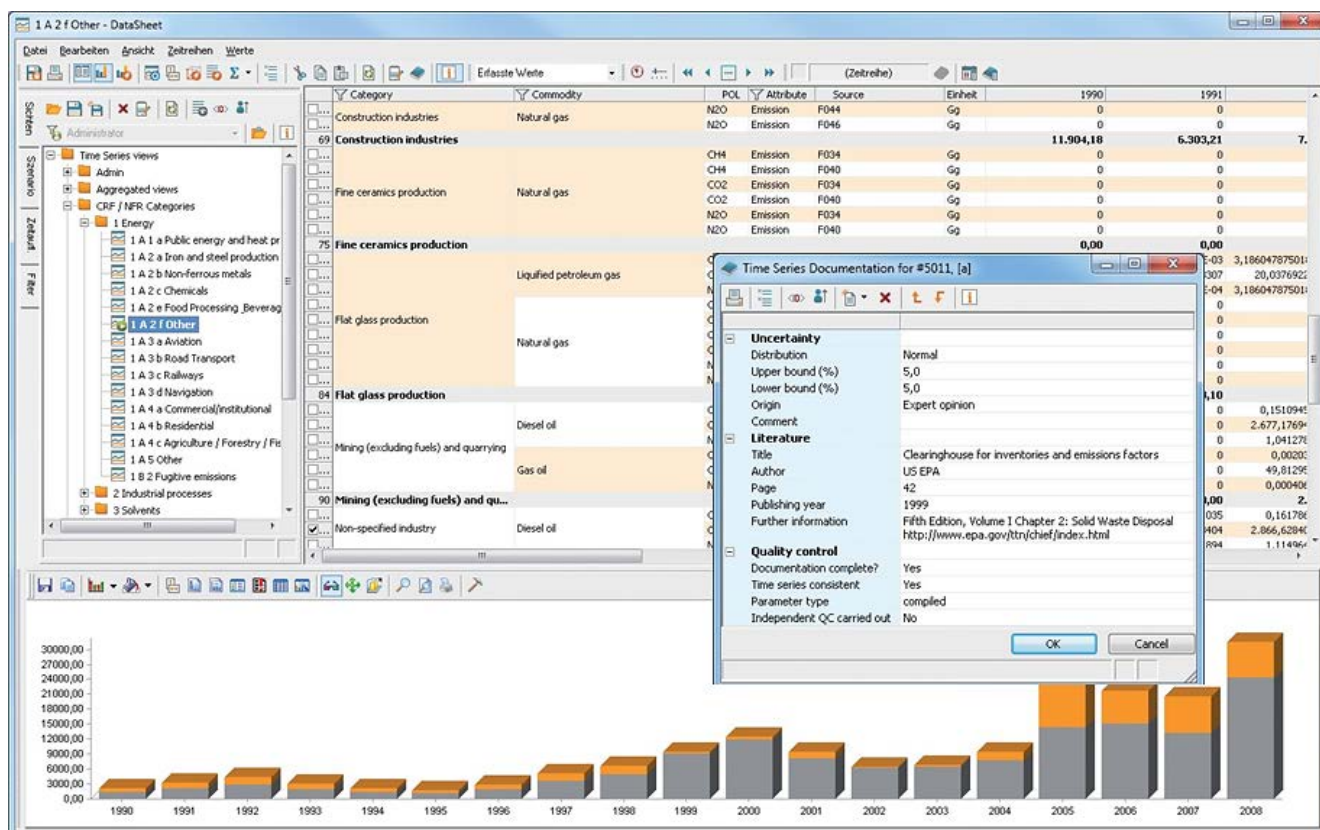
Obrázok 1. Základná schéma fungovania databázového systému MESAP.

Figure 1. Basic function scheme of database system MESAP.



Obrázok 2. Ukážka pracovného prostredia softvéru MESAP pri tvorbe časových radov.

Figure 2. Example of working environment of MESAP Software in time series.



V rámci prípravy emisných inventúr softvér spracováva nasledovné procesy, ktoré sa predtým spracovávali individuálne v rôznych programových prostrediach (Obr. 2):

1. **Vkladanie údajov:** Údaje je možné zadávať manuálne, alebo automaticky. Všetky zhromaždené hodnoty sú automaticky označené dátumom zmeny, používateľom a zdrojom. Vymazané alebo upravené hodnoty sú zobrazené v histórii.
2. **Spravovanie dát:** Informácie sa dajú prispôsobiť kvôli rýchlejšiemu pochopeniu a prístupu, používajú sa viaceré zdroje (CRF, NFR, SNAP) na správu a analýzu údajov. Riešenie je možné jednoducho upraviť tak, aby podporovalo nové alebo upravené formáty. Práca na emisných inventúrach je bezpečná a flexibilná, je možné vytvárať, upravovať a vymazávať body podľa príslušných prístupových práv. Ak je potrebné, údaje môžu byť sprístupnené iným oddeleniam alebo externým expertom.
3. **Kalkulácie:** Emisie sú počítané automaticky, od jednoduchých výpočtov až po zložitejšie výpočty počítané pomocou špeciálneho výpočtového nástroja so štandardnými matematickými a štatistickými funkciami. Výpočty sú prispôbené pre metódy Tier 1 a 2 na výpočet neistoty pomocou simulácie Monte Carlo.

4. **Validácie (QA/QC):** Údaje je možné overiť pomocou integrovaných kontrol s definovanými kritériami, štandardami a úrovňou kvality podľa požiadaviek krajiny. Celú databázu je možné skontrolovať podľa vybraných kritérií, napríklad agregované údaje nie sú vyššie ako celkové hodnoty.
5. **Analýza kľúčových zdrojov:** Na základe výpočtu emisií a neistoty sa môže vykonať analýza kľúčových kategórií podľa príručky IPCC 2006, výsledky sa exportujú ako súbory csv.
6. **Analýza neurčitosti:** Tento nástroj vypočítava neistotu podľa príručky IPCC 2006. Pomocou metódy Prístup 1 agreguje neistoty časových radov emisií pomocou jednoduchého agregáčného vzorca. Pomocou metódy Prístup 2 vypočíta neistotu kategórie vykonaním simulácie Monte-Carlo, ktorá získa všetky príslušné neistoty aktivity a emisných faktorov.
7. **Tvorba reportov a prevodník:** Analýza údajov, vytvorenie správy a aktualizácia údajov pre nasledovné cykly predkladania inventúr je možná pomocou pomocného databázového programu. Údaje sú validované, aktuálne a platné, obsahujú hodnoty priamo prepojené s databázou. Tieto zostavy je možné použiť na generovanie všetkých správ, analýzu kľúčových kategórií alebo na vytváranie grafov a tabuliek pre textové správy.

5 VÝSLEDKY A ZÁVER

Celkové antropogénne emisie skleníkových plynov Slovenskej republiky reportované pod UNFCCC k 15. aprílu 2023 za rok 2021 dosiahli 41 226 Gg CO₂ ekvivalentov bez započítania záchytov zo sektoru LULUCF a bez započítania nepriamych emisií z priemyselných rozpúšťadiel a poľnohospodárstva. Reportované emisie skleníkových plynov v celom časovom rade boli stanovené podľa 2006 IPCC Guidelines a nereflektovali zmeny v metodických príručkách a kategóriách. Práve reflektovanie zmien a nových metodických postupov na základe 2019 IPCC Refinement bolo náplňou projektu EMISIE. Zároveň bolo potrebné overiť predbežnú analýzu Európskej komisie, ktorá identifikovala, že až 25 % všetkých emisií skleníkových plynov bude ovplyvnených zmenami pri prechode na nový Parížsky režim.

Porovnaním výsledkov sme zistili, že zatiaľ, čo v roku 1990 bolo ovplyvnené zmenami približne 5,4 % všetkých emisií skleníkových plynov, v roku 2021 to bolo až 12,6 %. Napriek tomu, že množstvo zmenených emisií skleníkových plynov je vysoké hlavne v roku 2021 (alebo v posledných 10 rokoch), sa však nepotvrdila predbežná vysoká hodnota emisií v ohrození, určená v analýze Európskej komisie (25 %).

Nové emisné inventúry boli vyhodnotené po jednotlivých sektoroch a významných kategóriách a celkovo sa zistilo, že najvýznamnejšie zmeny nastali v kategórii fugitívnych emisií metánu a N₂O z baní, zemného plynu a ropy (1.B), v sektore poľnohospodárstvo (3) a emisiách metánu a N₂O v kategórii odpadové vody (5.D). Ostatné sektory a kategórie neboli významnejšie ovplyvnené. Detailnejšie sa jednotlivým sektorom a kategóriám venujú nasledujúce kapitoly.

5.1 Emisná inventúra skleníkových plynov v sektore Spaľovanie palív v stacionárnych zdrojoch (CRF 1.A.1, 1.A.2, 1.A.4, 1.A.5)

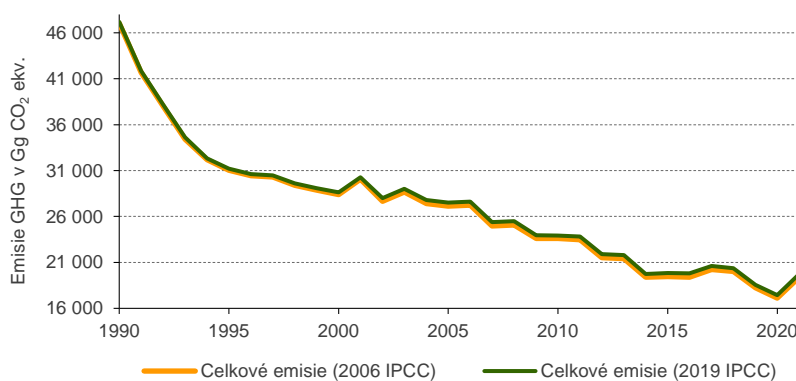
Významnou zmenou v procese inventarizácie emisií skleníkových plynov je využitie nových koeficientov globálneho otepľovania. GWP je meradlom toho, koľko tepla v atmosfére zachytí skleníkový plyn v určitom časovom horizonte vo vzťahu ku CO₂ (CO₂ má GWP hodnotu 1). V piatej hodnotiacej správe IPCC (AR5) bola hodnota GWP pre CH₄ zvýšená na 28 a pre N₂O klesla na 265. Využitie nových hodnôt GWP neovplyvní samotnú bilanciu plynov CH₄ a N₂O, ale nutne dôjde k zmene celkových emisií skleníkových plynov. Porovnanie určenia emisií CH₄ a N₂O pre jednotlivé kategórie stacionárneho spaľovania v jednotkách ekvivalentov emisií CO₂ (CO₂ ekv.) je uvedené na Obr. 3.

5.2 Emisná inventúra skleníkových plynov v sektore Doprava (CRF 1.A.3)

Zdrojom zmeny v inventarizácii emisií skleníkových plynov v sektore Doprava je zmena koeficientov globálneho otepľovania GWP. Metodické postupy v tomto sektore neprešli revíziou, a teda rozdiel v emisiách na Obr. 4 spôsobuje len rozdiel v koeficientoch GWP (AR4 verzus AR5). Tieto sa menili pre emisie CH₄ a N₂O (Tab. 1), ktoré nie sú v tomto sektore významné a rozdiel medzi inventúrami je preto minimálny, a to na úrovni -0,1 %. Vzhľadom na pokles GWP pre emisie N₂O došlo v konečnom dôsledku k miernemu poklesu celkových emisií skleníkových plynov vyjadrených v CO₂ ekvivalentoch.

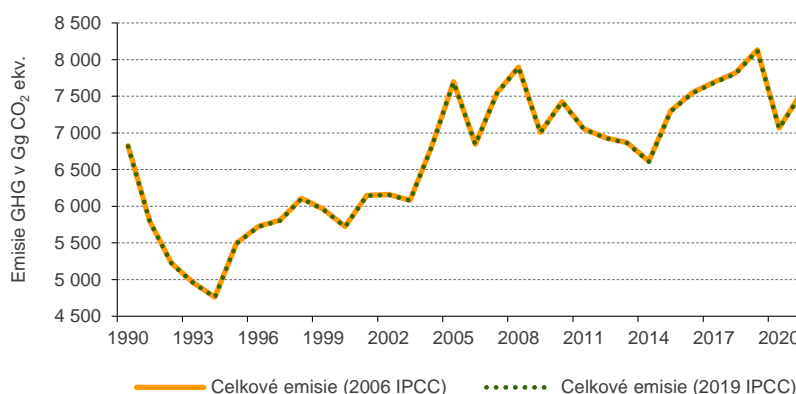
Obrázok 3.
Porovnanie celkových emisií v sektore Energetika, stacionárne spaľovanie palív podľa metodiky 2006 IPCC Guidelines a 2019 IPCC Refinement.

Figure 3.
Comparison of total GHG emissions in Energy sector, stationary combustion of fuels according to the 2006 IPCC Guidelines and 2019 IPCC Refinement.



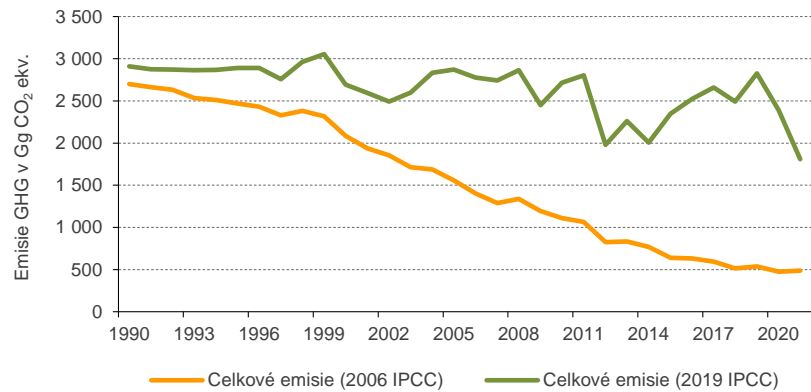
Obrázok 4.
Porovnanie celkových emisií v sektore Doprava podľa metodiky 2006 IPCC Guidelines a 2019 IPCC Refinement.

Figure 4.
Comparison of total GHG emissions in Transport sector according to the 2006 IPCC Guidelines and 2019 IPCC Refinement.



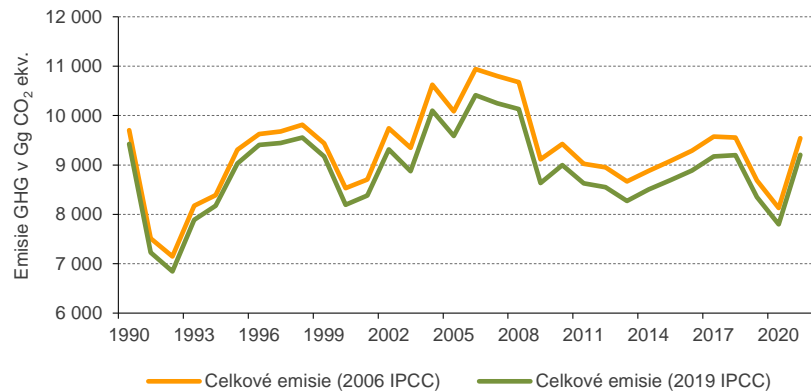
Obrázok 5.
Porovnanie celkových emisií
v sektore Fugitívnych emisií podľa
metodiky 2006 IPCC Guidelines
a 2019 IPCC Refinement.

Figure 5. Comparison of total GHG emissions in Fugitive emissions according to the 2006 IPCC Guidelines and 2019 IPCC Refinement.



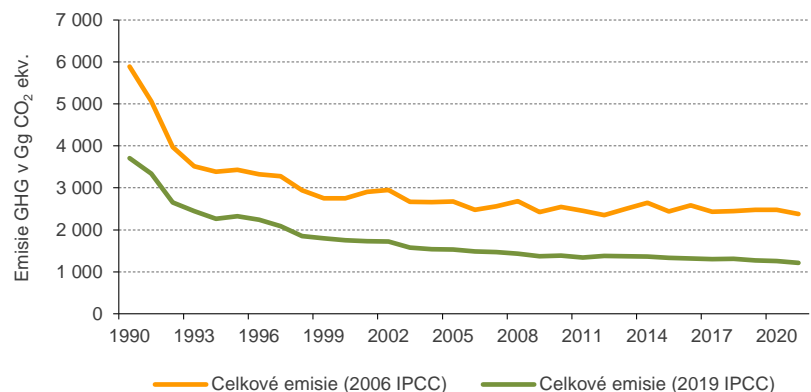
Obrázok 6.
Porovnanie celkových emisií
v sektore IPPU podľa metodiky
2006 IPCC Guidelines
a 2019 IPCC Refinement.

Figure 6. Comparison of total GHG emissions in IPPU sector according to the 2006 IPCC Guidelines and 2019 IPCC Refinement.



Obrázok 7.
Porovnanie celkových emisií
v sektore Poľnohospodárstvo podľa
metodiky 2006 IPCC Guidelines
a 2019 IPCC Refinement.

Figure 7. Comparison of total GHG emissions in Agricultural sector according to the 2006 IPCC Guidelines and 2019 IPCC Refinement.



5.3 Emisná inventúra skleníkových plynov v sektore Fugitívne emisie (CRF 1.B)

Emisie sektora fugitívnych emisií sú výrazne ovplyvnené zmenami v emisných faktorov jednotlivých kategórií a zavedením nových kategórií. V tomto sektore nedochádza k mernej zmene, ale pravdepodobne ide o najvýraznejšiu zmenu naprieč všetkými sektormi, keď sa nárast emisií pohybuje od 7,8% v roku 1990 až po 428,0% v roku 2019. Fugitívne emisie tvoria najmä emisie metánu, pričom tento sektor bol pred implementáciou tretím najvýznamnejším zdrojom emisií metánu v celej inventúre. Zmeny a porovnania za celý sektor fugitívnych emisií sú zosumarizované na Obr. 5.

5.4 Emisná inventúra skleníkových plynov v sektore IPPU (CRF 2)

Emisie CO₂ sú ovplyvnené len vylúčením výroby vodíka zo sektora IPPU. Emisie ostatných plynov sú ovplyvnené me-

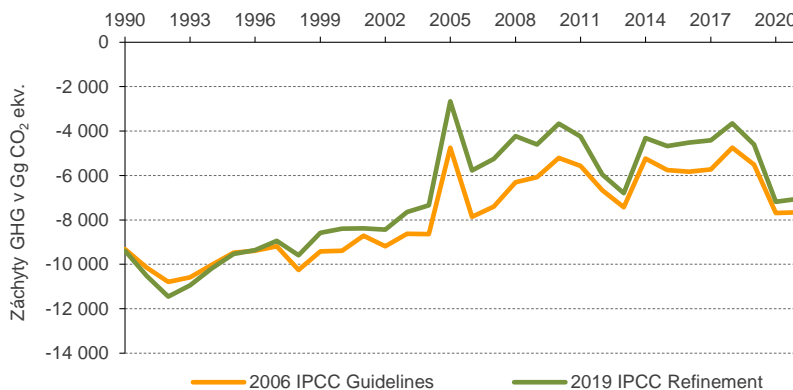
todickými zmenami v kategóriách výroby kyseliny dusičnej, výroby železa a ocele a výroby hliníka, ako aj zmenami GWP dotknutých plynov. Zmeny a porovnania za celý sektor IPPU sú zosumarizované na Obr. 6.

5.5 Emisná inventúra skleníkových plynov v sektore Poľnohospodárstvo (CRF 3)

Na základe implementácie postupov z 2019 IPCC Refinement sú celkové antropogénne emisie skleníkových plynov Slovenskej republiky v sektore poľnohospodárstvo za rok 2021 na úrovni 1 885,08 Gg CO₂ ekv. Vypočítaná hodnota je o 21% nižšia ako pri použití metodiky 2006 IPCC GL. Hlavné dôvody poklesu sú spôsobené najmä rekalkuláciou v kategórii 3.D Poľnohospodárske pôdy a dané sú zmenou hodnôt emisných faktorov, ktoré sú nižšie v porovnaní s predošlou verziou IPCC 2006 GL. Zmeny a porovnania za celý sektor Poľnohospodárstvo sú zosumarizované na Obr. 7.

Obrázok 8.
Porovnanie celkových záchytov
v sektore LULUCF podľa metodiky
2006 IPCC Guidelines a 2019 IPCC
Refinement.

Figure 8.
 Comparison of total GHG emissions
 in LULUCF sector according to
 the 2006 IPCC Guidelines and 2019
 IPCC Refinement.



5.6 Emisná inventúra skleníkových plynov v sektore LULUCF (CRF 4)

Príprava emisných inventúr skleníkových plynov na základe nových metodických postupov daných v 2019 IPCC Refinement metodických príručkách spočívala hlavne v dôkladnej analýze a preštudovaní uvedenej metodickej príručky a v aplikácii identifikovaných metodických zmien. V rámci emisnej inventúry skleníkových plynov v sektore LULUCF neboli žiadne skleníkové plyny pridané, redukované alebo zmenené. Naďalej sa bilancujú emisie oxidu uhličitého - CO₂, metánu - CH₄ a oxidu dusného N₂O. V kategórii Lesy nebola revidovaná metodika pre stanovenie zmien v zásobách uhlíka v biomase (biomass), nadzemnej (aboveground), podzemnej (belowground) a ani v odumretej organickej hmote (dead organic matter), ktorá zahŕňa odumreté drevo (dead wood) a opad (litter). Taktiež sa nezmenila metodika na stanovenie CO₂, ani tzv. „non-CO₂“ emisií skleníkových plynov, a to metánu a oxidu dusného, ktoré vznikajú pri spaľovaní biomasy, teda zvyškov po ťažbe dreva a pri lesných požiaroch (okrem meny GWP).

Použitím rôznych GWP stúpli CH₄ emisie v roku 2021 v kategórii 4.A Lesy zo 17,67 na 19,80 Gg CO₂ ekv. a klesli emisie N₂O z 11,65 na 10,36 Gg CO₂ ekv.

Zaujímavou skutočnosťou je významný pokles záchytov v kategórii 4.B Orná pôda, a to pôdou, nakoľko záchyty biomasou ostávajú nezmenené. Napriek pomerne malým zmenám faktorov relatívnej zmeny zásob pre využitie pôdy a faktorov zmeny zásob pre režim riadenia obhospodarovania podľa 2019 IPCC Refinement, ako aj pre ročné plodiny, tak aj pre viacročné nastáva cca 35 % redukcia záchytov skleníkových plynov v pôdach. Vyplýva to najmä z veľkej výmery orných pôd, ktorá sa prejaví takto na celkovej bilancii záchytov a emisií GHG na ornej pôde a trvalých kultúrach.

Porovnanie záchytov skleníkových plynov v kategórii 4.C trávne porasty hodnotené podľa metodiky 2006 IPCC GL a 2019 IPCC Refinement je bez zmien, nakoľko nedošlo k zmenám v novej metodike. Pri emisiách N₂O (Gg) došlo k zmene v metodike koeficientu GWP, ktorý bol znížený v AR5 z hodnoty 298 na 265. V sektore 4.C trávne porasty sa vykazuje N₂O (Gg), avšak jeho hodnota je marginálna v celkovom hodnotení. Pri prepočte na emisný ekvivalent došlo k miernej korekcii v sledovanom časovom rade od roku 1990 až 2021.

V sektore LULUCF stúpli CH₄ emisie zo 17,67 na 19,80 Gg CO₂ ekv. a klesli emisie N₂O z 36,05 Gg CO₂ ekv. na 32,06 Gg CO₂ ekv. (Obr. 8).

5.7 Emisná inventúra skleníkových plynov v sektore Odpadové vody (CRF 5.D)

Výsledkom analýzy v sektore odpadových vôd bolo potvrdenie, že v oblasti tvorby emisií metánu a oxidu dusného nenastanú veľmi významné zmeny v metodike. Mierne zmeny emisií metánu (cca ± 10 %) nastanú v dôsledku detailnejších výpočtov, presnejších emisných faktorov pre tvorbu týchto plynov v prostredí odpadových vôd.

Možno významnejšou zmenou je zvýšenie vypočítanej produkcie N₂O v dôsledku zavedenia nových emisných faktorov pre procesy odstraňovania dusíka na čistiarnach odpadových vôd. Tieto zmeny sú dôsledkom detailnejšieho popisu procesu tvorby metánu a oxidu dusného vo vypúšťaných odpadových vodách, čistených aj nečistených, do vodných útvarov.

Možno konštatovať, že zmeny, ktoré je potrebné vykonať pre aplikovanie postupov opísaných v 2019 IPCC Refinement, sa dajú realizovať v časovom horizonte projektu bez získavania/dohľadávania dodatočných údajov. Zmeny a porovnania za celý sektor Odpadové vody sú zosumarizované na Obr. 9.

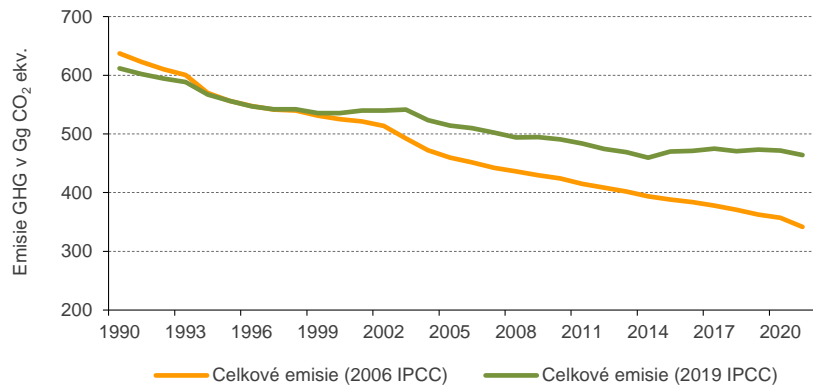
5.8 Emisná inventúra skleníkových plynov podľa 2019 IPCC Refinement

Projekt EMISIE priniesol očakávané inovácie a zlepšenia do procesu inventarizácie emisií skleníkových plynov, ktoré sa naplno prejaví pri príprave prvej BTR správy k 31. decembru 2024. Implementáciou nových metodických príručiek a softvérového produktu MESAP dôjde k:

- Plnej harmonizácii vstupných údajov od rôznych zainteresovaných expertov, ich validácii a uložení do jedného centrálného databázového systému vytvoreného priamo na mieru daným softvérom, priame použitie do výpočtov, žiadne posielanie údajov mailom alebo prenos na USB zariadeniach, odbúranie možnosti straty údajov, vymazanie, zmeny budú evidované a zapísané v softvéri.

Obrázok 9.
Porovnanie celkových emisií
v sektore Odpadové vody podľa
metodiky 2006 IPCC Guidelines
a 2019 IPCC Refinement.

Figure 9.
 Comparison of total GHG emissions
 in Wastewater category according
 to the 2006 IPCC Guidelines and
 2019 IPCC Refinement.



- Plnej automatizácii výpočtov a spracovaniu (zautomatizované kontroly softvéru obmedzia prípadnú chybovosť), dodržaniu správnej politiky spracovania big data, výpočty budú prebiehať na centrálnych PC, nebude potrebné špeciálne IT vybavenie každého experta, ale každý si bude môcť spracovať údaje na centrálnom PC a výsledky si stiahnuť k sebe do vlastného počítača.
- Zvýšeniu stupňa ochrany údajov, ich zálohovanie (viacnásobné) a archivácia, čo je aj jedna z podmienok pre vedenie národných systémov (práca s citlivými údajmi).
- Zvýšeniu stupňa automatizácie výstupov podľa požadovaných formátov, odpadne množstvo administratívne náročnej práce pri kopírovaní a vytváraní rôznych reportov z databázových údajov.
- Odbúraníu nedostatku odborných kapacít, riešiteľských hodín a možnosť venovať sa viac kvalite, vede a výskumu, ako aj realizácii ďalších povinností v zmysle reportovania údajov o zmene klímy za Slovenskú republiku.

Z analýzy uvedenej aj na Obr. 10 vyplýva, že celkové zmeny emisií skleníkových plynov boli najvýznamnejšie

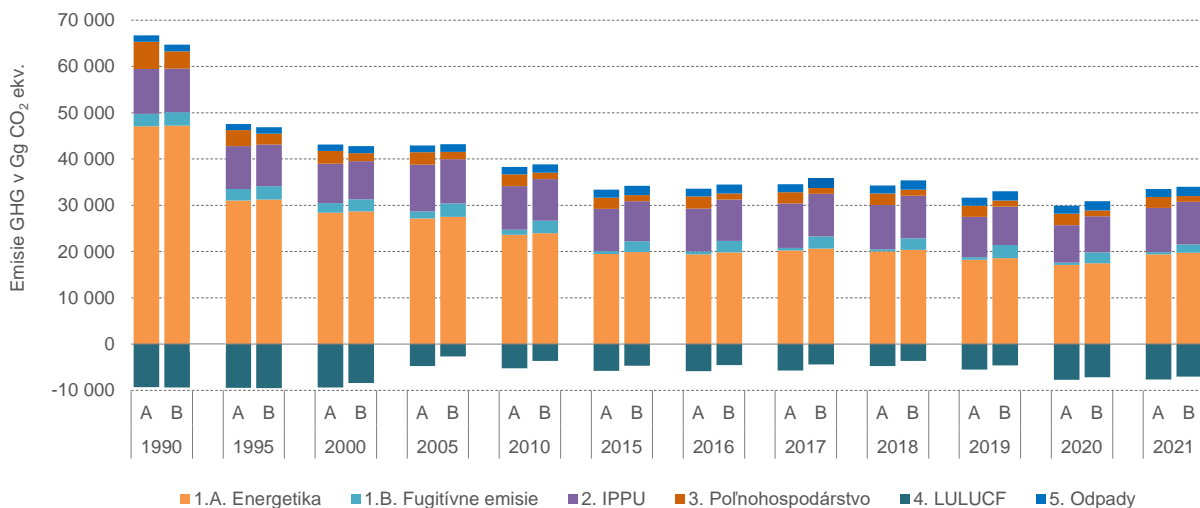
v sektorech fugitívne emisie, poľnohospodárstvo a odpadové vody. Celkovo emisie poklesli v roku 1990 o 4 %, najviac však v sektore poľnohospodárstvo (37 %), v roku 2021 emisie skleníkových plynov celkovo vzrástli o 4 %, najviac v sektore fugitívne emisie (skoro štvornásobne).

6 LITERATÚRA

- [1] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/> [citované 2023-7-6].
- [2] 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html> [citované 2023-7-6].
- [3] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook, <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1/emep-eea-air-pollutant-emissioninventory-guidebook> [citované 2023-7-6].
- [4] IPCC Fifth Assessment Report, 2014, <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>.
- [5] IPCC Fourth Assessment Report, 2007, <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>.

Obrázok 10. Porovnanie celkových emisií skleníkových plynov podľa metodiky 2006 IPCC Guidelines (A) a 2019 IPCC Refinement (B).

Figure 10. Comparison of total GHG emissions according to the 2006 IPCC Guidelines (A) and 2019 IPCC Refinement (B).



VÝSLEDKY ŠTATISTICKÉHO ZISŤOVANIA ZAMERANÉHO NA VYKUROVANIE DOMÁCNOSTÍ, ŠTRUKTÚRU SPAĽOVACÍCH ZARIADENÍ A SPOTREBU PALÍV

ROMAN MACH, MARCEL ZEMKO, JANKA SZEMESOVÁ, KRISTÍNA TONHAUZER, LENKA ZETOCHOVÁ

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

This article is focused on the results of statistical surveys, which represent the current situation in the field of individual heating of houses and apartments with solid fuels (coal, briquettes, wood) focusing on the area with low air quality. The survey was carried out as part of the project LIFE IP - Improving of Air Quality. Data from 4,690 surveyed households (which is 1,676 more compared to the statistical survey in 2019) showed that the use of solid fossil fuels has a decreasing trend, and on the contrary, the number of households using alternative fuels such as wood pellets and briquettes for space and water heating, has increased compared to 2017 and 2019. The data further showed that the percentage of insulated and reconstructed family houses is still increasing and that the combustion equipment in households are modernized. The percentage of modern low-emission devices in the examined households has increased as well, at the expense of outdated high-emission devices.

Článok je zameraný na výsledky štatistického zisťovania a reprezentujú aktuálnu situáciu v oblasti individuálneho vykurovania domov a bytov tuhými palivami (uhlie, brikety, drevo) so zameraním na oblasti najviac ohrozené zhoršenou kvalitou ovzdušia. Prieskum bol uskutočnený v rámci projektu LIFE IP – Zlepšenie kvality ovzdušia. Z údajov od 4 690 vyšetrených domácností (čo je o 1 676 viac v porovnaní so štatistickým zisťovaním z roku 2019) vyplynulo, že využívanie fosílnych tuhých palív má klesajúci trend, a naopak, množstvo domácností využívajúcich alternatívne palivá, ako sú drevené pelety a brikety na vykurovanie a ohrev vody, narastá v porovnaní s rokmi 2017 a 2019. Údaje ďalej ukázali, že percento zateplených a rekonštruovaných rodinných domov sa stále zvyšuje a dochádza tiež k modernizácii spaľovacích zariadení v domácnostiach. Navýšil sa tiež percentuálny podiel moderných, nízkoemisných zariadení vo vyšetrených domácnostiach na úkor zastaraných vysokoemisných.

Key words: households, biomass, statistical survey, energy balance, fuel wood, emissions, fuel consumption

ÚVOD

Znečisťujúce látky v ovzduší majú nepriaznivý vplyv na životné prostredie aj zdravie občanov. Znečistenie ovzdušia môže u ľudí vyvolať rôzne nepriaznivé zdravotné účinky, od zápalu pľúc až po predčasné úmrtie. Slovenská republika je jedným z členských štátov Európskej Únie, ktoré čelia problémom s kvalitou ovzdušia. K znečisťujúcim látkam, ktoré majú negatívny vplyv na kvalitu ovzdušia, patria prachové častice PM₁₀ a jemné prachové častice PM_{2,5}, benzo(a)pyrén, oxid dusičitý NO₂ a prízemný ozón (SHMÚ, 2024). Podľa Európskej environmentálnej agentúry (EEA), bolo v Európskej únii v roku 2020 vystavených koncentráciám jemných prachových častíc PM_{2,5}, ktoré prekračujú limitnú úroveň stanovenú Svetovou zdravotníckou organizáciou, až 96 % mestského obyvateľstva, čo viedlo k 238 000 predčasným úmrtiam (EEA, 2022). Hlavnými zdrojmi znečistenia ovzdušia sú doprava, priemysel, energetika a vo veľkej miere lokálne kúreniská so spaľovaním tuhých palív v domácnostiach. Zo zdravotného hľadiska sú veľmi nebezpečné jemné prachové častice PM_{2,5}, ktoré sú schopné prenikať hlboko do pľúc a vstúpiť do krvného obehu, čo môže spôsobiť kardiovaskulárne a respiračné ochorenia [1]. Sektor domácností prispieva

k celkovým emisiám častíc PM_{2,5} najvýraznejšie (až 81 % podiel na celkových emisiách PM_{2,5} na Slovensku) (SHMÚ – Odbor emisie a biopalivá, 2023). Práve preto je veľmi dôležité čo najdetailnejšie poznať údaje o spotrebe palív, typoch využívaných palív a vykurovacích telies v domácnostiach. Menované údaje zlepšujú a spresňujú odhady emisií skleníkových plynov a znečisťujúcich látok zo sektoru domácností. Spresnené emisné inventúry môžu byť využité na identifikáciu rizikových oblastí, v ktorých dochádza k zhoršeniu kvality ovzdušia vplyvom zvýšenej produkcie emisií znečisťujúcich látok. Analýza zdrojov znečisťovania ovzdušia v rizikových oblastiach slúži ako podklad pre prijímanie nových opatrení na zmiernenie emisií znečisťujúcich látok.

Členitosť geomorfológie Slovenskej republiky zapríčiňuje, že regionálne rozdiely v kvalite ovzdušia pri vzniku nežiaducich javov, ako sú smogové situácie, sú značné. Preto bolo ostatné štatistické zisťovanie uskutočnené s cieľom získať reprezentatívne výsledky od väčšej vzorky domácností na regionálnej úrovni, vďaka čomu bude možné spresnenie regionálnych inventúr emisií skleníkových plynov a znečisťujúcich látok.

PRÍPRAVA A CIELE ŠTATISTICKÉHO ZISŤOVANIA

V rokoch 2017 a 2019, SHMÚ - Odbor Emisie a biopalivá realizoval štatistické zisťovania o spaľovacích zariadeniach a spotrebe palív v domácnostiach, ktoré prebehli v spolupráci so Štatistickým úradom Slovenskej republiky (ŠÚ SR) (Szemesová a kol., 2021). V nadväznosti na tieto štatistické zisťovania sa zrealizovalo v roku 2022 v poradí už tretie štatistické zisťovanie. Toto zisťovanie bolo financované z projektu LIFE IP – Zlepšenie kvality ovzdušia¹, ktorého cieľom je zlepšiť kvalitu ovzdušia a znížiť vystavenie obyvateľstva škodlivým vplyvom znečisťujúcich látok, a to aj napríklad podporou vzdelávacích, komunikačných a monitorovacích aktivít partnerov zapojených do oblasti kvality a ochrany ovzdušia.

Do zisťovania bolo zaradených 494 obcí. Informácie o štatistickom zisťovaní boli pred jeho vykonaním vopred zaslané primátorom a starostom obcí, ktorí tieto informácie ďalej sprostredkovali obyvateľom obcí, či už prostredníctvom obecného rozhlasu, zverejnením na webovej stránke obce alebo vo vysielaní mestskej/regionálnej televízie. Následne boli listom kontaktované vybrané domácnosti, ktorým bol zaslaný aj celý text dotazníka.

Cieľom tohto štatistického zisťovania bolo najmä získanie detailnejších a presnejších údajov o spotrebe palív, druhoch využívaných vykurovacích zariadení a informáciách o tepelnoizolačných vlastnostiach bytov a domov. Získané údaje poskytli jasnejší obraz o regionálnej situácii a potvrdili veľké regionálne rozdiely v počte domácností, ktoré vykurujú tuhými palivami. Štatistická vzorka domácností bola vybraná tak, aby boli všetky samosprávne kraje dostatočne zastúpené.

Z regionálnych údajov je možné identifikovať problémové oblasti, v ktorých sa zvýšenou mierou vykuruje tuhými palivami a kde v zimných mesiacoch nastávajú meteorologické javy, ako sú inverzie brániace vertikálnemu miešaniu vzduchu. Táto kombinácia môže viesť k zvýšeným koncentráciám znečisťujúcich látok spôsobujúcich zdravie ohrozujúce situácie.

Získané údaje po ich detailnejšom spracovaní budú použité pri rekonštrukcii časového radu emisií v sektore domácností a pri príprave údajov pre projekcie emisií na obdobie do roku 2050.

REALIZÁCIA VÝBERU VZORKY

Podobne, ako v predchádzajúcich štatistických zisťovaniach, bola databáza sčítania obyvateľov, domov a bytov (SODB 2021) východiskom pre identifikáciu opory výberu a do vzorky boli zaradené všetky domácnosti spĺňajúce tieto kritériá:

- dom je obývaný;
- typ domu je rodinný dom, dvojdom alebo radový dom;

- typ vykurovania je ústredné lokálne kúrenie, etážové kúrenie, samostatné vykurovacie teleso;
- tuhé palivo bolo uvedené ako primárny zdroj energie na vykurovanie.

Vo výberovej vzorke boli domácnosti, ktoré označili v SODB 2021, že prioritne vykurujú tuhým palivom. Vybraných bolo 6 650 domácností (o 2 550 domácností viac ako v roku 2019) zo 494 obcí (ŠÚ SR, 2022). Štatistické zisťovanie bolo vykonané prostredníctvom externých opytovateľov ŠÚ SR, ktorí navštívili vybrané domácnosti. Z celkového počtu dotazníkov bolo vyplnených 70,5%. Najväčší podiel spolupracujúcich domácností bol v Banskobystrickom kraji (72,4%), naopak, najmenší podiel bol v Nitrianskom kraji (68,1%).

Výberový súbor bol vytvorený Štatistickým úradom Slovenskej republiky dvojstupňovým stratifikovaným náhodným výberom zo základného súboru, čo znamená, že základný súbor bol rozdelený na straty² podľa určených kritérií a v rámci strát sa realizoval dvojstupňový náhodný výber, pričom prvý stupeň výberu tvorili jednotlivé obce v stratách (vybrané náhodne s pravdepodobnosťou úmernou veľkosti obce) a v druhom stupni sa následne realizoval náhodný výber domácností v obciach vybraných v prvom stupni.

Každá i -tá domácnosť v h -tom kraji (strate) výberového súboru má priradenú váhu w_h , ktorá reprezentuje všetky ostatné domácnosti straty. Súčet váh sa v každej strate rovná jej celkovému referenčnému počtu domácností a vypočíta sa ako:

$$w_h = \frac{N_h}{n_h}, \quad (1)$$

kde N_h je počet domácností v h -tej strate základného súboru a n_h predstavuje počet zodpovedajúcich domácností v h -tej strate.

Potom celková veľkosť výberovej vzorky n je:

$$n = \sum_{h=1}^H n_h. \quad (2)$$

Cieľom tohto štatistického zisťovania bolo najmä získanie reprezentatívnejších výsledkov na úrovni krajov. Tab. 1 obsahuje údaje o počte domácností vo výbere v jednotlivých krajoch. V porovnaní s rokmi 2017 a 2019 bol do zisťovania zaradený väčší počet domácností najmä v Bratislavskom a Trnavskom kraji. V predchádzajúcich zisteniach boli výsledky, práve v dôsledku tejto disproporcie výberu vzorky, reprezentatívne len na úrovni Slovenska. V najnovšom prieskume sú však dostatočne zastúpené všetky kraje, a preto je možné interpretovať výsledky, ktoré sú štatisticky relevantné na regionálnej úrovni pre všetky kraje Slovenskej republiky.

¹ Projekt LIFE IP - Zlepšenie kvality ovzdušia (LIFE18 IPE/SK/000010): <https://minzp.sk/life-populair/>

² Sociálna stratifikácia (strata = vrstva). Stratifikovaný náhodný výber vzoriek zahŕňa rozdelenie celej populácie do homogénnych skupín nazývaných vrstvy (množné číslo pre stratum).

Tabuľka 1. Podiel vybraných a spolupracujúcich domácností po krajoch - porovnanie štatistických zisťovaní.

Table 1. Share of selected and cooperating households by region - comparison of statistical surveys.

Región	Zisťovanie	Počet domácností vo výbere			Počet spolupracujúcich domácností			Podiel [%] spolupracujúcich domácností		
		2017	2019	2022	2017	2019	2022	2017	2019	2022
BA	Bratislavský kraj	28	60	700	21	43	493	75,0	71,7	
TT	Trnavský kraj	119	200	820	87	142	575	73,1	71,0	70,1
TN	Trenčiansky kraj	231	490	850	170	359	599	73,6	73,3	70,5
NR	Nitriansky kraj	189	360	840	141	253	572	74,6	70,0	68,1
ZA	Žilinský kraj	483	940	870	364	691	612	75,4	73,5	70,3
BB	Banskobystrický kraj	483	940	860	352	707	623	72,9	75,2	72,4
PO	Prešovský kraj	336	660	860	245	489	618	72,9	74,1	71,9
KE	Košický kraj	231	450	850	169	330	598	73,2	73,3	70,4
SR	SLOVENSKO	2 100	4 100	6 650	1 549	3 014	4 690	73,8	73,5	70,5

Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2017, 2019 a 2022.

DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Dotazník, ktorý opytovatelia vyplňali v spolupráci s obyvateľmi domácností zo vzorky, sa veľmi detailne zaoberal zariadeniami a palivami, ktoré domácnosti využívajú na vykurovanie, ohrev vody a ďalšie aktivity. Dotazník sa skladal z troch častí:

- časť A, ktorá sa zaoberala údajmi o domoch – počet obývaných bytov v dome, obdobie výstavby a rekonštrukcie domu, typ a rok danej rekonštrukcie, celková plocha domu (resp. bytu), aká časť celkovej plochy je vykurovaná a na akú teplotu;
- časť B, ktorá sa zaoberala údajmi o palivách a spaľovacích zariadeniach – zdroje energie využívané na vykurovanie a ohrev vody, množstvo obstarávaného paliva, dĺžka skladovania dreva v prípade domácností využívajúcich ako palivo drevo, z akých zdrojov domácnosti obstarávajú tuhé palivá, spotreba benzínu a nafty v domácnostiach, ktoré používajú pre záhradnú techniku, typ a počet vykurovacích a ohrevných telies;

- časť C, ktorá sa zaoberala údajmi o spaľovacích zariadeniach – detailné informácie o spaľovacích a ohrevných telesách (maximálny výkon zariadenia, rok inštalácie a vek, druh a množstvo spotrebovaného paliva).

Časť A dotazníka – údaje o domoch

Prvá časť dotazníka sa podrobne zaoberala tým, v akom stave sú domy/byty využívajúce tuhé palivá ako primárny zdroj energie. Tieto údaje sa využívajú pri určovaní energetickej náročnosti a efektívnosti domov/bytov, z čoho sa v kombinácii s výsledkami z ďalších častí dotazníka o palivách a spaľovacích zariadeniach určuje energetická spotreba a následne emisie znečisťujúcich látok a skleníkových plynov v sektore domácností.

V Tab. 2 sa nachádzajú údaje o období výstavby (resp. kolaudácie) a poslednej rekonštrukcie domov. Z výsledkov vyplýva, že najväčší podiel domov bol postavený v povojnovom období v rokoch 1945–1980. Tempo výstavby sa odvtedy výrazne znížilo, naopak, zvýšila sa miera rekonštrukcie domov. Až v 74,9 % domov bol vykonaný nejaký druh rekonštrukcie (zateplenie obvodových stien, výmena okien, tepelná izolácia strechy), najviac po roku 2010 (57,6 %), čo v porovnaní s predchádzajúcim štatistickým zisťovaním predstavuje 8 %-ný nárast. Najväčší podiel zrekonštruovaných domov sme pozorovali v Prešovskom a Košickom kraji. Rozdiely medzi kraji však neboli príliš výrazné.

Tab. 3 obsahuje údaje o jednotlivých typoch rekonštrukcie a percentuálnom zastúpení domov, v ktorých bola vykonaná tepelná izolácia strechy, tepelná izolácia obvodových stien a výmena okien. Z podielu zrekonštruovaných rodinných domov vyplýva, že 82 % z nich malo vymenené okná, v 42 % z nich bola vykonaná izolácia obvodových stien a 31 % zrekonštruovaných rodinných domov malo zateplené strechy.

Tabuľka 2. Analýza údajov o období výstavby a rekonštrukcie domov.

Table 2. Analysis of data on the period of construction and reconstruction of houses.

Indikátor	Podiel v %	95 %-ný interval spoľahlivosti		CI (95 %)
		Dolná hranica	Horná hranica	
Obdobie/rok kolaudácie				
1919 a skôr	6,3	5,6	6,9	0,6
1920–1945	14,1	13,2	15,0	0,9
1946–1960	22,6	21,5	23,7	1,1
1961–1980	31,6	30,3	32,8	1,3
1981–2000	16,1	15,1	17,2	1,0
2001–2010	4,2	3,7	4,8	0,6
2011–2015	2,6	2,1	3,0	0,4
2016 a neskôr	2,5	2,0	2,9	0,4
Obdobie/rok poslednej rekonštrukcie				
pred 1980	1,0	0,8	1,3	0,3
1980–1990	0,7	0,5	0,9	0,2
1991–1995	0,6	0,4	0,8	0,2
1996–2000	1,6	1,3	1,9	0,3
2001–2005	3,7	3,2	4,3	0,5
2006–2009	9,7	8,9	10,5	0,8
2010–2015	25,2	24,0	26,4	1,2
2016 a neskôr	32,4	31,1	33,6	1,3
bez rekonštrukcie	25,1	23,9	26,3	1,2

Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.

Tabuľka 3. Analýza údajov o type rekonštrukcie domov.
Table 3. Analysis of data on the type of houses renovation.

Indikátor	Podiel v %	95 %-ný interval spoľahlivosti		CI (95 %)
		Dolná hranica	Horná hranica	
Vykonaná tepelná izolácia strechy				
áno	23,1	22,0	24,3	1,1
nie	76,9	75,7	78,0	1,2
Vykonaná tepelná izolácia obvodových stien				
áno	23,4	22,2	24,5	1,1
častočne	8,3	7,5	9,0	0,8
nie	68,4	67,1	69,6	1,3
Vykonaná výmena okien				
áno	51,8	50,5	53,2	1,3
častočne	9,9	9,1	10,7	0,8
nie	38,3	37,0	39,6	1,3
Vykonaná rekonštrukcia od roku 2020				
áno	12,5	11,6	13,4	0,9
nie	87,5	86,6	88,4	0,9

Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.

Tabuľka 4. Podiel domácností využívajúcich zemný plyn, elektrickú energiu a drevené pelety a brikety na vykurovanie a ohrev vody.

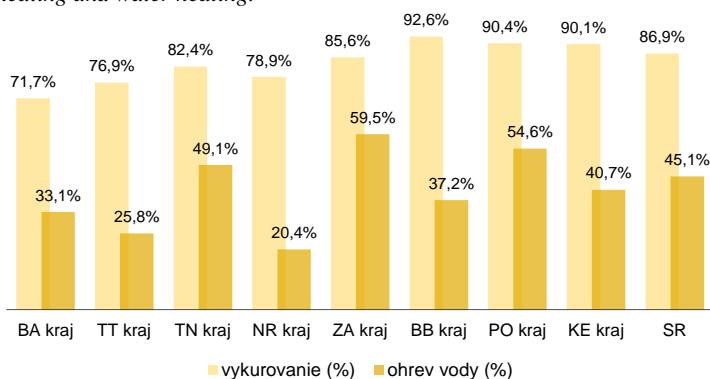
Table 4. Share of households using natural gas, electricity, wood pellets and briquettes for space heating and water heating.

Zdroj energie	Vykurovanie			Ohrev vody		
	2017	2019	2022	2017	2019	2022
Zemný plyn	15,6%	16,6%	14,8%	12,2%	14,9%	12,6%
Elektrická energia	8,0%	13,9%	14,6%	65,6%	64,9%	64,4%
Drevené pelety a brikety	7,1%	8,7%	11,4%	3,8%	4,3%	5,5%

Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.

Obrázok 1. Podiel domácností využívajúcich drevo ako zdroj energie pri vykurovaní a ohreve vody.

Figure 1. Share of households using wood as an energy source for space heating and water heating.



Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.

Časť B dotazníka – údaje o palivách

Časť B dotazníka poskytla údaje o palivách využívaných v domácnostiach vykurojúcich tuhým palivom. Údaje potvrdili výsledky z predošlých štatistických zisťovaní a vyplynulo z nich, že najpoužívanejším palivom je drevo, ktoré na vykurovanie využíva až 87 % domácností (pokles o 2 % v porovnaní s rokom 2019). Najviac domácností

využíva drevo na vykurovanie v Banskobystrickom kraji (93 %) a najmenej v Bratislavskom kraji (72 %). V prípade ohrevu vody drevo využíva 45 % domácností, najviac v Žilinskom kraji (60 %) a najmenej v Nitrianskom kraji (20 %). Podiel domácností, ktoré využívajú drevo na vykurovanie a/alebo ohrev vody, je zobrazený na Obr. 1.

Po dreve boli najzastúpenejším zdrojom energie pri vykurovaní alternatívne palivá s nižšími emisiami. V Tab. 4 je zobrazené porovnanie podielu domácností využívajúcich elektrinu, zemný plyn a drevené pelety a brikety pri vykurovaní a ohreve vody v rokoch 2017, 2019 a 2022. Z údajov je možné vidieť, že sa zvýšila miera využívania elektrickej energie, drevených peliet a brikiet pri vykurovaní a tiež mierny nárast využívania peliet a brikiet pri ohreve vody. Údaje z tohto štatistického zisťovania potvrdili pokračovanie prechodu na modernejšie a ekologickejšie palivá.

Z hľadiska množstva obstarávaného paliva (Obr. 2) jednoznačne vedie palivové drevo, ktoré predstavuje takmer 78 % z celkového množstva. To v porovnaní s predchádzajúcim zisťovaním z roku 2019 (vtedy množstvo obstarávaného dreva predstavovalo 84 % celkových palív) predstavuje pokles o 6 %. Pozitívom je tiež pokles množstva zaobstarávaného hnedého uhlia, ktoré má z hľadiska emisií znečisťujúcich látok a skleníkových plynov najhoršie vlastnosti, zo 4,4 % na 1,7 %. Zvýšilo sa tiež množstvo zaobstarávaných drevených peliet (z 2,3 % na 3,8 %) a tiež drevených brikiet (z 1,5 % na 2,6 %).

Na Obr. 3 je zobrazené regionálne rozloženie celkového množstva dreva zaobstarávaného domácnosťami na Slovensku. Z údajov vyplynulo, že najviac z celkového množstva dreva si zaobstarávajú domácnosti v Banskobystrickom kraji (32 %), a naopak, najmenej dreva si zaobstarávajú domácnosti v Bratislavskom kraji (len necelé percento).

Negatívom je, že z celkového množstva domácností, ktoré používajú palivové drevo, vzrástol počet tých, čo uviedli, že drevo vôbec neskladujú a pritom tvrdia, že nekupujú suché drevo (takmer 21 %); táto hodnota narástla v porovnaní s rokom 2019 o 3 p. b. (18 %). Z analýzy údajov týkajúcich sa vykurovacej praxe v domácnostiach vyplýva, že stále veľa domácností (42,5 % ± 1,4 % pri spoľahlivosti odhadu 0,95) skladuje drevo nedostatočne (len jednu sezónu) a potom ho spáli (Tab. 5). V prípade, že domácnosť kupuje čerstvé drevo, po jednom roku skladovania nemusí byť drevo ešte dostatočne vysušené, čo znižuje jeho tepelné vlastnosti a zvyšuje emisie z nedokonalého horenia (okrem toho aj znehodnocuje spaľovacie zariadenie a jeho súčasti). Uhlie, uhoľné brikety a drevo si domácnosti, podobne ako v roku 2019, najčastejšie zaobstarávali z domácich zdrojov.

Najlepšiu vykurovaciu prax majú domácnosti vykurujúce drevom v Žilinskom kraji, kde až 48 % domácností skladuje drevo aspoň dve sezóny predtým, ako ho spáli alebo nakupuje suché drevo. Naopak, najhoršiu vykurovaciu

prax majú domácnosti v Nitrianskom kraji, kde až 40 % domácností neskladuje vlhké drevo ani po dobu jednej sezóny (Obr. 4).

Tabuľka 5. Analýza skladovania dreva a obstarávania uhlia, uhoľných brikiet a dreva.

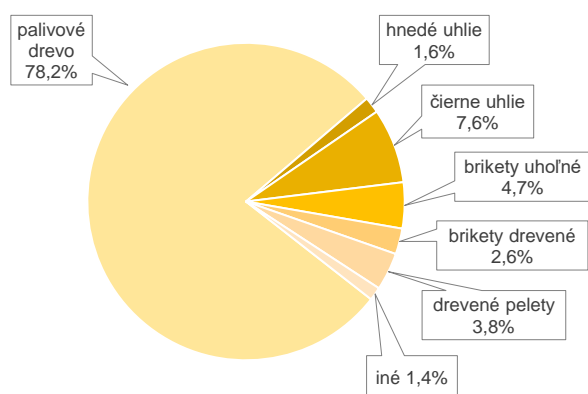
Table 5. Analysis of wood storage and procurement of coal, coal briquettes and wood.

Odpovede	Počet	95%-ný interval spoľahlivosti		CI (95 %)
		Dolná hranica	Horná hranica	
Dĺžka skladovania dreva pred použitím [%]				
Vôbec neskladujem	20,9	19,7	22,0	1,2
Neskladujem, kupujem drevo suché	12,3	11,4	13,2	0,9
Skladujem jednu sezónu a potom ho spálím	42,5	41,1	43,9	1,4
Skladujem dve sezóny a potom ho spálím	24,3	23,1	25,6	1,3
Zdroj zvyčajného obstarávania uhlia, uhoľných brikiet a dreva [%]				
Domáce zdroje	94,3	93,7	95,0	0,7
Polsko	0,8	0,5	1,0	0,3
Česká republika	0,3	0,1	0,5	0,2
Ukrajina	0,2	0,1	0,4	0,1
Iné zdroje	4,4	3,8	5,0	0,6

Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.

Obrázok 2. Podiel množstva jednotlivých druhov palív zakúpených/obstaraných domácnosťami na Slovensku za rok 2022.

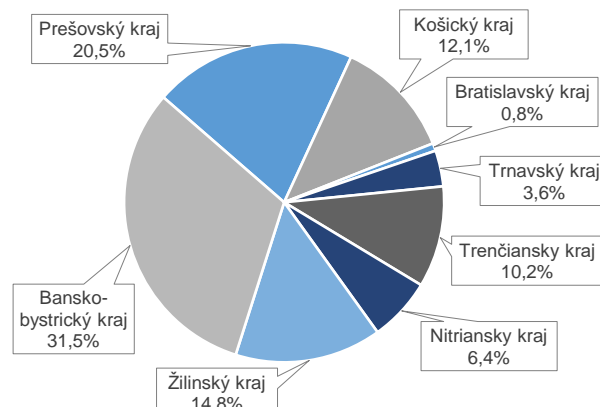
Figure 2. Share of the individual types of fuel purchased/obtained by households in Slovakia in 2022.



Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.

Obrázok 3. Podiel krajov na množstve zakúpeného/obstaraného dreva domácnosťami za rok 2022.

Figure 3. Share of regions in the amount of wood purchased/procured by households in 2022.

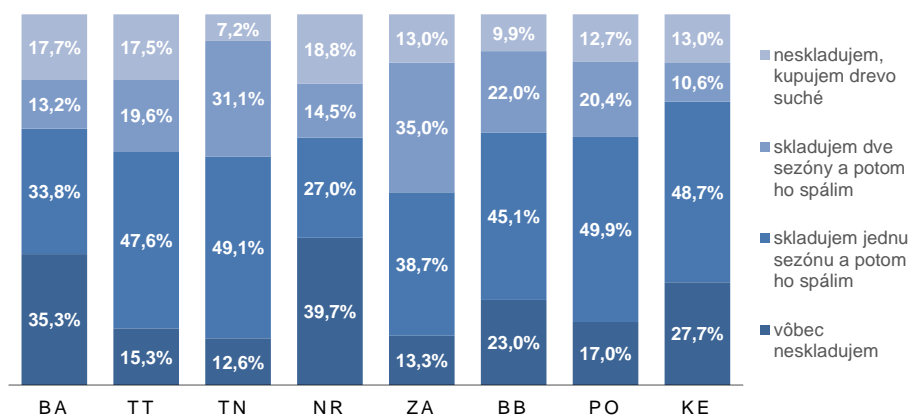


Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.

Obrázok 4. Analýza skladovania dreva na úrovni krajov.

Figure 4. Analysis of wood storage at regional level.

Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.



Časť C dotazníka – údaje o zariadeniach

Časť C dotazníka sa zaoberala tým, aký typ a počet vykurovacích a spaľovacích zariadení domácnosti používajú. Je samozrejmé, že niektoré domácnosti majú viac spaľovacích zariadení, resp. diverzifikujú ich účel (napr. ohrev vody bojlerom, kúrenie kotlom a pod.). Na Obr. 5 je zobrazené zastúpenie spaľovacích zariadení v domácnostiach. Najvyššie percento (až 30 %) predstavujú elektrické bojler, v tomto čísle je zarátané aj podlahové (elektrické) kúrenie; v počte nasledujú klasické kotle, ktorými ešte stále kúri štvrtina domácností; krby a krbové kachle využíva 22 % domácností. 13 % domácností používa na vykurovanie a prípravu teplej úžitkovej vody jedno z moderných zariadení, ktorým môžu byť napríklad solárne kolektory, poloautomatický alebo splyňovací kotol, moderné kachle alebo automatická peletová pec. Podiel moderných zariadení v porovnaní s rokom 2019 vzrástol o 2 %.

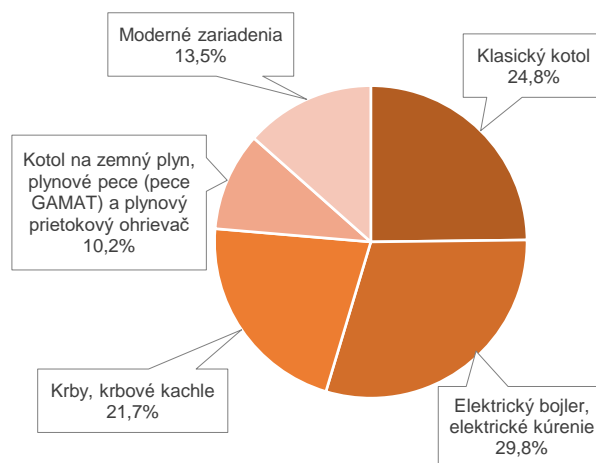
Zariadenia môžeme rozdeliť na: a) vysokoemisné, kam patria klasické kotle: krby, krbové vložky, piecky, kachle a kachľové pece; b) elektrické, kam zaraďujeme: elektrické bojler a elektrické podlahové kúrenie a c) nízkoemisné, kam boli začlenené splyňovacie a poloautomatické kotle, kotle na zemný plyn/LPG, plynové pece (pece GAMAT, ...), automatické peletové pece, moderné krbové kachle, tepelné čerpadlá, solárne a fotovoltaické zariadenia.

Pri prvom štatistickom zisťovaní v roku 2017, tvorili vysokoemisné zariadenia viac ako polovičný podiel vykurovacích a spaľovacích zariadení v domácnostiach (54 %), zatiaľ čo nízkoemisných zariadení bolo len okolo 15 %. Medzi rokmi 2017 a 2019 sa zvýšil podiel nízkoemisných zariadení z 15 % na 19,5 %. V roku 2022 sa potvrdil narastajúci trend využívania moderných nízkoemisných zariadení a ich podiel predstavoval takmer štvrtinu (23,7 %). To predstavuje nárast o 8,7 % v priebehu piatich rokov (Obr. 6).

V jednotlivých krajoch bola štruktúra zariadení rozdielna a z údajov na Obr. 7 je vidieť, že najväčší podiel nízkoemisných zariadení majú domácnosti v Bratislavskom kraji (39,5 %), naopak, najnižší v Banskobystrickom kraji (len 16,7 %). V prípade vysokoemisných zariadení bol najvyšší podiel evidovaný v Prešovskom kraji (až 52,2 %), a naopak, najnižší v Trnavskom kraji (34,2 %).

Obrázok 5. Zastúpenie jednotlivých spaľovacích zariadení v domácnostiach na Slovensku v roku 2022.

Figure 5. Share of different types of combustion devices in Slovak households in 2022.

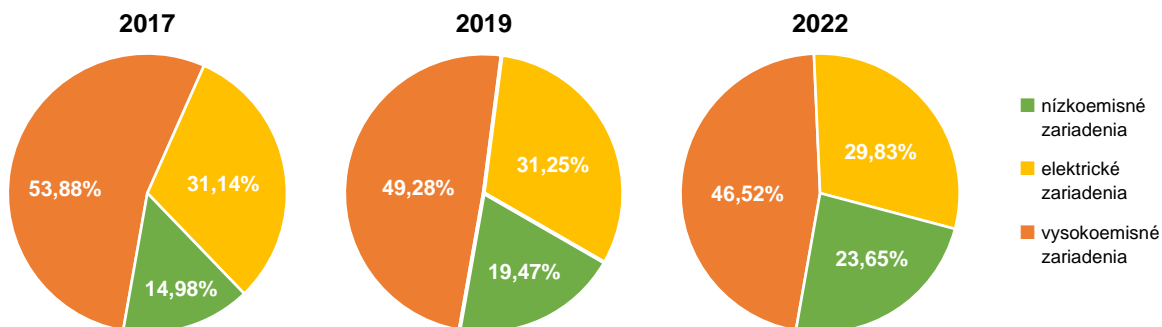


Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.

Ďalším zistením z časti C je priemerný vek najčastejšie používaných spaľovacích zariadení. Získané údaje sú zobrazené v Tab. 6 na úrovni krajov. Priemerný vek kotlov v porovnaní s rokom 2019 mierne stúpol (z 11,0 rokov na 11,6). Zo všetkých kotlov nie je starších ako 10 rokov 53 % zariadení a až 89 % zo všetkých kotlov nie je starších ako 20 rokov. Najnovšie kotle majú domácnosti v Bratislavskom kraji (priemerný vek je 10,4 rokov) a najstaršie v Trnavskom (13,1 rokov). Priemerný vek krbových kachlí a pecí sa v porovnaní s rokom 2019 nezmenil (16,9 rokov). Zo všetkých krbových kachlí a pecí nie je starších ako 10 rokov 39 % zariadení a 73 % zo všetkých krbových kachlí a pecí nie je starších ako 20 rokov. Najstaršie krbové kachle a pece majú domácnosti v Prešovskom kraji (20,5 rokov) a najnovšie v Nitrianskom kraji (12,9 rokov). Priemerný vek elektrických zariadení v porovnaní s rokom 2019 klesol z 10,7 roka na 10,0 rokov. Mierne klesol tiež priemerný vek kotlov na zemný plyn a plynových pecí GAMAT z 11,7 na 11,4 rokov.

Obrázok 6. Porovnanie zastúpenia spaľovacích zariadení v domácnostiach na Slovensku v rokoch 2017, 2019 a 2022.

Figure 6. Comparison of the share of combustion devices in Slovak households in 2017, 2019 and 2022.



Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2017, 2019 a 2022.

Tabuľka 6. Analýza priemerného veku spaľovacích zariadení.

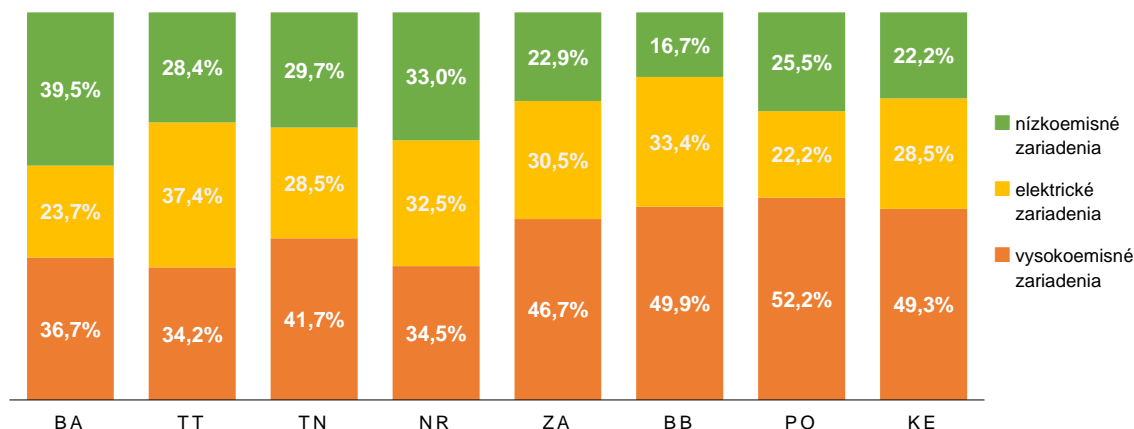
Table 6. Analysis of the average age of combustion devices.

Región	Vek	95 %-ný interval spoľahlivosti		CI (95 %)
		Dolná hranica	Horná hranica	
Klasický, automatický a splyňovací kotel				
Bratislavský kraj	10,4	9,3	11,4	1,0
Trnavský kraj	13,1	12,0	14,1	1,0
Trenčiansky kraj	11,8	11,0	12,5	0,8
Nitriansky kraj	12,4	11,2	13,7	1,2
Žilinský kraj	11,7	11,0	12,4	0,7
Banskobystrický kraj	11,5	10,7	12,3	0,8
Prešovský kraj	11,1	10,2	11,9	0,8
Košický kraj	11,4	10,4	12,3	1,0
SR	11,6	11,3	11,9	0,3
Elektrický bojler				
Bratislavský kraj	9,1	8,0	10,3	1,1
Trnavský kraj	10,5	9,6	11,3	0,8
Trenčiansky kraj	11,2	10,3	12,2	0,9
Nitriansky kraj	9,7	8,8	10,5	0,9
Žilinský kraj	10,1	9,3	10,8	0,7
Banskobystrický kraj	9,9	9,2	10,6	0,7
Prešovský kraj	10,3	9,2	11,3	1,1
Košický kraj	9,1	8,3	9,8	0,7
SR	10,0	9,7	10,3	0,3
Krbové kachle a pece				
Bratislavský kraj	15,0	13,7	16,3	1,3
Trnavský kraj	14,4	13,2	15,6	1,2
Trenčiansky kraj	13,7	12,2	15,2	1,5
Nitriansky kraj	12,9	11,7	14,1	1,2
Žilinský kraj	16,0	14,6	17,4	1,4
Banskobystrický kraj	16,8	15,8	17,9	1,1
Prešovský kraj	20,5	19,3	21,8	1,2
Košický kraj	17,7	16,8	18,6	0,9
SR	16,9	16,5	17,3	0,4
Kotel na zemný plyn a plynové pece GAMAT				
Bratislavský kraj	10,3	8,9	11,8	1,4
Trnavský kraj	12,6	11,2	14,1	1,4
Trenčiansky kraj	11,8	9,8	13,7	2,0
Nitriansky kraj	10,9	9,3	12,5	1,6
Žilinský kraj	12,3	10,8	13,9	1,5
Banskobystrický kraj	10,3	8,3	12,4	2,1
Prešovský kraj	10,6	9,3	11,9	1,3
Košický kraj	12,0	10,4	13,6	1,6
SR	11,4	10,8	11,9	0,6

Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.

Obrázok 7. Porovnanie zastúpenia spaľovacích zariadení v domácnostiach na regionálnej úrovni za rok 2022.

Figure 7. Comparison of the share of combustion devices in households at regional level for 2022.



Zdroj: SHMÚ, štatistické zisťovanie domácností 2022.

ZÁVER

Hlavnou úlohou opakovaných štatistických zisťovaní bolo spresniť bilanciu tuhých palív, predovšetkým biomasy (palivové drevo) na regionálnej úrovni. V porovnaní s prvými dvomi zisťovaniami bola v treťom zisťovaní vzorka domácností rovnomernejšie rozdelená na úrovni krajov, čo nám pomohlo splniť tento cieľ. Z údajov uvedených v tomto článku vyplýva, že všetky tri štatistické zisťovania potvrdili postupný trend znižovania spotreby palív a zvyšovania podielu obnoviteľných zdrojov energie na Slovensku (zvyšujúci sa podiel biomasy, znižujúci sa podiel fosílnych tuhých palív). Tretie štatistické zisťovanie taktiež potvrdilo trend modernizácie spaľovacích zariadení, zvýšenie podielu a tempa rekonštrukcie rodinných domov. K tomu veľkou mierou prispeli investície štátu v rámci podporných programov a dotácií³.

Z analýzy na úrovni krajov vyplynulo, že najviac dreva a tuhých fosílnych palív sa spaľuje v Banskobystrickom a Prešovskom kraji. V týchto krajoch sa vykuruje v najväčšej miere vo vysokoemisných zastaraných zariadeniach. Naopak, najmenej dreva a tuhých fosílnych palív sa spaľuje v krajoch na Západnom Slovensku. Tieto domácnosti tiež využívajú na vykurovanie vo väčšej miere nízkoemisné zariadenia (výnimkou je Trenčín s vysokým podielom vysokoemisných zariadení). V prípade domácností, ktoré využívajú ako palivo drevo, majú najlepšiu vykurovaciu prax z pohľadu skladovania dreva domácností v Žilinskom a Trenčianskom kraji. Naopak, najmenej domácností, ktoré skladujú drevo pred spálením dostatočne dlhú dobu, je v Bratislavskom a Košickom kraji.

Výsledky svojím rozsahom a charakterom pomohli analyzovať aktuálny stav v oblasti vykurovania domácností tuhými palivami na Slovensku. Tie sú nevyhnutné pri tvorbe účinných plánov, opatrení a politik šitých na mieru na národnej, ale hlavne regionálnej úrovni. Zlepšenie kvality ovzdušia priamo súvisí so zlepšením zdravotného stavu dotknutého obyvateľstva a prispieva k zlepšeniu životného

prostredia. Emisné inventúry a účty emisií do ovzdušia⁴ by mali predovšetkým slúžiť ako kvalitná odborná environmentálna štatistika a podklad pri príprave vhodných opatrení a stimulov Ministerstva životného prostredia SR (MŽP SR) na zníženie emisií vypúšťaných do ovzdušia.

Regionálnou analýzou je možná identifikácia rizikových oblastí, vďaka čomu bude možné vytvorenie vhodných opatrení na obnovu rodinných domov, výmenu zastaraných spaľovacích zariadení a inštaláciu obnoviteľných zdrojov energie, a to najmä v regiónoch so zhoršenou kvalitou ovzdušia.

LITERATÚRA

- Kolektív odboru monitorovania kvality ovzdušia SHMÚ. *Správa o kvalite ovzdušia v Slovenskej republike - 2022. Január 2024.* [online]. [cit. 9.2.2024]. Dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=oko_roc_sEurópska_environmentálna_agentúra,Air_Quality_in_Europe-2022_report.No_05/2022.ISBN_978-92-9480-515-7.ISSN_1977-8449.doi:10.2800/488115. [online]. [cit. 23.10.2023]. Dostupné na: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022>.
- Emisie skleníkových plynov a znečisťujúcich látok. [online]. [cit. 24.10.2023]. Dostupné na: <https://oeab.shmu.sk/emisie/domacnosti/trendy.html>.
- Szemesová, J.–Zemko, M.–Petráš, M.–Frankovič, B., 2021, *Vyhodnotenie štatistického zisťovania o spaľovacích zariadeniach a spotrebe palív v domácnostiach. Slovenská štatistika a demografia* 31(5): 72–93.
- Garecová–Šúrik–Halušková, 2022, *Interný dokument – sprievodná správa k zhodnoteniu štatistického zisťovania v domácnostiach. Štatistický úrad Slovenskej republiky. Banská Bystrica, Bratislava.*
- Projekt LIFE IP - Zlepšenie kvality ovzdušia (LIFE18 IPE/SK/000010): <https://minzp.sk/life-populair/>.
- Zelená domácnostiam: <https://zelenadomacnostiam.sk/sk/domacnosti/>.
- Nariadenie (ES) No.691/2011 o európskych environmentálnych ekonomických účtov.

³ Zelená domácnostiam: <https://zelenadomacnostiam.sk/sk/domacnosti/>

⁴ Účty emisií do ovzdušia (AEA) zaznamenávajú toky plyných a tuhých látok emitovaných do atmosféry v dôsledku hospodárskej činnosti. Podľa nariadenia (ES) No.691/2011 o európskych environmentálnych ekonomických účtov.

VYUŽITIE H2O ML A FEATURE ENGINEERINGU PRE PREDIKCIU TEPLoty VODY V RIEKE LITAVA

ZBYNEK BAJTEK

Institute of Hydrology, SAS, Dúbravská cesta č. 9, 841 04 Bratislava, Slovakia

Water temperature is often perceived as a primary indicator of water quality, hence the need for accurate prediction tools for streams without direct measurements that can accurately predict its evolution based on other readily available meteorological characteristics, for example from climate stations. In recent years, together with the development of computational technology, there has been a rapid development of various mathematical tools and models that allow us to predict stream water temperature with a certain degree of accuracy. Nowadays, we can say that Machine Learning (ML) methods, among others, are experiencing a great growth. However, the methods themselves are only as good as the inputs to these models. Another essential factor in their application is so called Feature Engineering. This element does not only involve the actual analysis of the input data and the cleaning of missing features but also the creation of new variables that would provide the model with an additional feature that would better describe the data and the relationship between them. Therefore, in addition to the actual application of ML in this case H2O ML, the paper focuses on the impact of selected variables on the accuracy of the models.

Teplota vody je často vnímaná ako primárny indikátor kvality vody, z čoho vyplýva potreba presných predpovedných nástrojov pre toky bez priamych meraní, ktoré by dokázali presne predpovedať jej vývoj na základe iných ľahko dostupných meteorologických charakteristík - napríklad z klimatických staníc. V posledných rokoch spolu s rozvojom výpočtovej techniky nastal aj rýchly nástup rozvoj rôznych matematických nástrojov a modelov, ktoré nám umožňujú s určitou mierou presnosti predpovedať teplotu vody v tokoch. V súčasnosti môžeme konštatovať, že zaznamenávajú veľký nárast medzi inými aj metódy Machine Learning - strojového učenia (SU). Samotné metódy sú však len natoľko dobré, ako sú dobré vstupy do týchto modelov. Ďalší podstatný faktor v ich aplikácii predstavuje tzv. Feature Engineering, čo by sme mohli preložiť ako Inžinierstvo Parametrov (IP). Tento prvok nezahŕňa len samotnú analýzu vstupných údajov a očistenie od chýbajúcich prvkov, ale tiež tvorbu nových premenných, ktoré by modelu poskytli ďalší prvok, ktorý by lepšie popísal dané údaje a vzťah medzi nimi. Preto sa príspevok okrem samotnej aplikácie SU, v tomto prípade H2O ML, zameriava na vplyv vybraných premenných, ale aj na presnosť modelov.

Key words: Machine Learning, Feature Engineering, river water temperature, prediction

ÚVOD

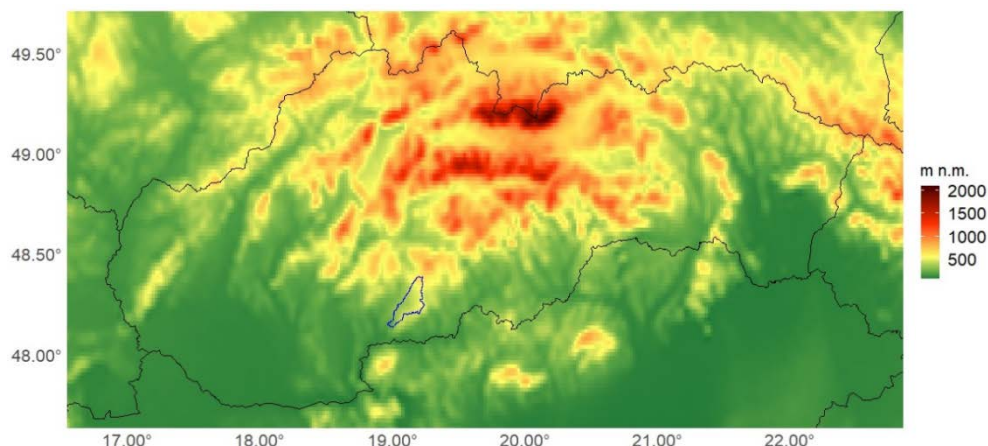
Rieky sú hybnou silou našej planéty ako zdroj pitnej vody, alebo ako zdroj vody pre závlahu a priemysel. V dôsledku klimatickej zmeny spôsobenej ľudskou činnosťou sa však teplota vody v riekach mení, čo má významný vplyv na ich ekosystémy a celú ľudskú spoločnosť. Predpovedanie týchto teplotných zmien je kľúčové pre správne riadenie vodných zdrojov a ochranu biodiverzity. V tomto článku sa zaoberáme metódami a technológiami používanými na predpovedanie teploty vody v povrchových tokoch. Vývoj nástrojov na predpovedanie teploty vody v riekach prešiel výraznými zmenami. Spočiatku sa na predpovedanie teploty vody v rieke ako regresor používala najmä teplota vzduchu (Mohseni and Stefan, 1998; Zhu et al., 2019). Neskôr sa začali používať širšie súbory vstupných premenných, ako aj niektoré modifikácie štandardného lineárneho regresného modelu (Morrill et al., 2005) a nelineárne regresné modely (Bajtek et al., 2022; Mohseni and Stefan, 1998). Rovnako sa uplatňujú aj SARIMA modely (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) na predpovedanie teploty vody v riekach (Pekárová et al., 2023). Ďalším modelom je napríklad air2stream hybridný model na predpovedanie teploty riečnej vody, ktorý kombinuje fyzikálne založené štruktúru so stochastickou kalibráciou parametrov (Toffolon and Piccolroaz, 2015).

V posledných rokoch sa s rozvojom výpočtového výkonu a umelej inteligencie postupne začali používať nové modely na predpovedanie teploty riečnej vody. Sem môžeme zaradiť rôzne metódy strojového učenia, ako napríklad kroková lineárna regresia, random forest (RF), eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), dopredné neurónové siete (FNN) a dva typy rekurentných neurónových sietí (RNN). V štúdiu prezentovanej v práci (Feigl et al., 2021) sa hodnotí výkonnosť šiestich rôznych modelov strojového učenia na predpovedanie teploty vody v riekach. Autori použili viacero súborov vstupných údajov na rôznych veľkostiach povodia. Práca je originálna v tom, že sa použili rôzne klimatické premenné a ich kombinácie ako vstupy do modelov. Bayesovská optimalizácia bola tiež použitá na objektívny odhad hyperparametrov modelov. Výsledná výkonnosť všetkých modelov bola porovnaná s dvoma referenčnými modelmi, aby sa dosiahli porovnateľné výsledky. Autori v práci dospeli k záveru, že testované modely by mohli výrazne zlepšiť predpovedanie teploty vody v porovnaní s lineárnou regresiou a modelom air2stream. Rajesh and Rehana, (2021) skúmali použitie modelov strojového učenia v spojení s analýzou globálnej citlivosti na predpovedanie teploty vody v rieke. V štúdiu bola testovaná výkonnosť ridge regression (RR), K-nearest neighbors (KNN), random forest (RF), and support vector regression (SVR), spolu Sobol' global sensitivity analysis (GSA). V štúdiu sa dospelo

k záveru, že SVR je najrobustnejší ML model na predpovedanie RWT v mesačnej časovej škále. V článku navrhujú nový prístup na predpovedanie indexu a triedy kvality vody pomocou algoritmov strojového učenia. Navrhovaná metóda je založená na štyroch parametroch vody: teplota, pH, zákal a koliformných baktériách. Kombinuje strojové učenie (ML) a analýzu citlivosti (DA) s cieľom zlepšiť predpovede na základe meraných údajov. Navrhnutý algoritmus aplikovali na merané údaje o teplote vody v rieke. Hlavným cieľom štúdie bolo identifikovať najviac ovplyvňujúcu premennú pomocou algoritmu GSA a následne aplikovať rôzne ML modely na predpovedanie riečného toku. Podobne aj Souaissi et al., (2023) porovnáva dva modely strojového učenia - random forest (RF) a extreme gradient boosting (XGBoost) s neparametrickými viacrozmernými adaptívnymi regresnými spline (MARS) a semi parametrickými zovšeobecnenými aditívnymi modelmi (GAM), pričom sa zamerali na predpovedanie maximálnych teplôt riek. Predpovede sa robia na nameraných lokalitách, čo znamená, že použili len malé množstvo údajov alebo žiadne. Prezentované výsledky ukazujú najväčšiu presnosť u modelov GAM a MARS v kombinácii NLCCA+GAM, nasledovanou CCA+MARS. V kontexte premenných aplikovaných v modeloch predstavuje práca (Wade et al., 2023) zaujímavý pohľad, nakoľko sa autori zaoberali teplotnými charakteristikami tokov na území USA, pričom skúmali vplyv rôznych faktorov na tieto teplotné režimy. V tomto prípade použili verejne dostupné záznamy o teplote vody v tokoch z 410 lokalít, pričom sa zamerali na vplyv klímy, charakteristík povodia, hydrologických parametrov a antropogénnych vplyvov. Cieľom bolo zistiť, ako sa vplyv týchto faktorov mení v rôznych ročných obdobiach a priestorových oblastiach. V rámci štúdie sa zameriavali na dve základné metriky - maximálnu teplotu vody a teplotnú citlivosť - a použili prístup SU na odvodenie týchto parametrov teploty vody. Čo sa týka samotného H2O AutoML, Madni et al., (2023) aplikovali túto metódu na predpovedanie kvality pitnej vody. Experimenty vykonali s použitím rôznych scenárov s cieľom vytvoriť efektívny a presný automatizovaný systém na klasifikáciu a predpoveď kvality vody. Ďalším príkladom použitia H2O ML je napríklad práca Považanová et al., (2023), kde bol tento nástroj použitý na predikciu evapotranspirácie. Klasifikácia a predpovedanie kvality vody je dôležitým problémom, ktorý sa pokúša riešiť pomocou modelovania

Obrázok 1.
Povodie Litavy.

Figure 1.
Location of the
Litava river basin.



a strojového učenia. Existujú však výzvy spojené s nízkou presnosťou a chýbajúcimi hodnotami v údajoch.

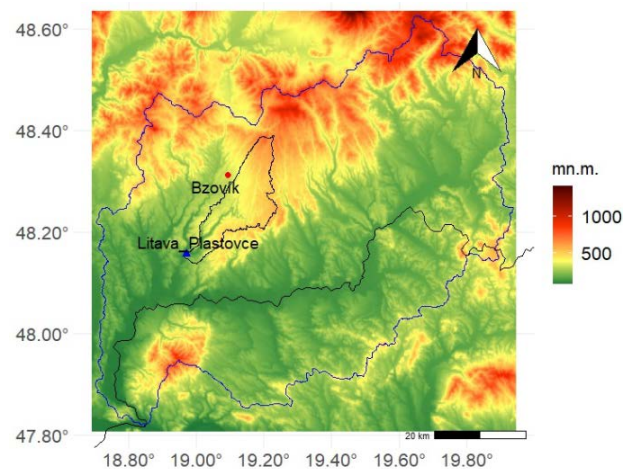
Tento článok sa zameriava na hľadanie parametrov v rámci IP, pričom vychádza z meraných veličín, ktoré boli doplnené o ďalšie syntetizované veličiny a následne bol testovaný ich vplyv na presnosť modelu a predpovedí. Prídanie týchto nových premenných spresnilo výsledky modelu a tiež možnosť aplikácie takýchto modelov na toky, kde nie sú priame merania teploty vody.

POPIS LOKALITY A POUŽITÝCH DÁT

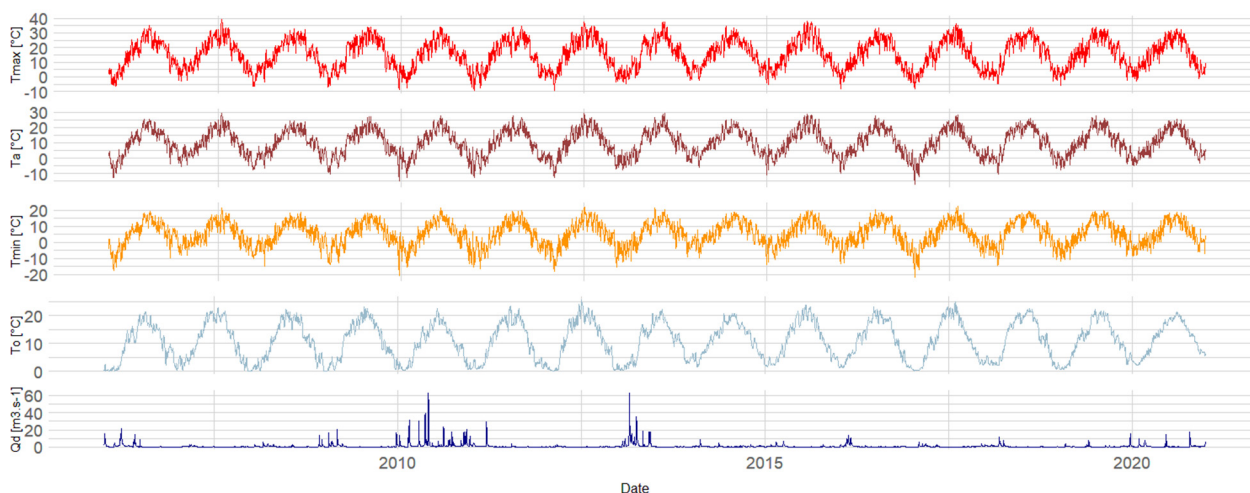
V našom prípade sme pracovali s dátami (zdroj SHMÚ) z klimatologickej stanice Id. 11902 – Bzovik, z ktorej bola použitá teplota vzduchu (T_a) v dennom kroku (roky 2006 – 2020) a z vodomernej stanice na rieke Litava Id. 7600 – Litava-Plášťovce. Jednalo sa o denné hodnoty prietokov vody Q_d a teploty vody T_o za roky 2006 – 2020. Rieka Litava je významný ľavostranný prítok Krupinice. Pramení v Krupinskej planine pod vrchom Javorok (695,0 m n. m.) v nadmorskej výške okolo 650 m n. m. Tečie najprv na juh cez obec Senohrad, zľava priberá Litavicu (451,5 m n. m.), ďalej preteká obcami Lackov a Litava, kde priberá riekou Malá Litava z ľavej strany. Má celkovú dĺžku 48 km.

Obrázok 2. Povodie Litavy v rámci povodia Ipeľ'a.

Figure 2. The Litava river basin within the Ipeľ' river basin.



Obrázok 3. Priebeh teplôt T_a , T_{max} , T_{min} zo stanice Bzovik a teploty vody T_o a Q_d denných prietokov zo stanice Litava-Plášťovce.
 Figure 3. Temperatures T_a , T_{max} , T_{min} from station Bzovik and water temperature T_o and Q_d of daily flows from station Litava-Plášťovce.



POPIS H2O ML MODELU

H2O AutoML (LeDell and Poirier, 2020) je open source platforma pre strojové učenie a prediktívnu analýzu, ktorá umožňuje vytvárať modely SU na veľkých objemoch dát a poskytuje jednoduchú aplikáciu týchto modelov v rôznych programovacích prostrediach. Jadro kódu H2O je napísané v jazyku Java. Vnútri H2O sa na prístup k údajom, modelom, objektom atď. a odkazovanie na ne vo všetkých uzloch a strojoch používa distribuované úložisko kľúčov/hodnôt. Algoritmy sú implementované nad distribuovaným rámcom H2O a využívajú rámec Java Fork/Join na viacvláknové spracovanie. Údaje sa čítajú paralelne, sú distribuované v rámci klastra a ukladajú sa do pamäte v stĺpcovom formáte komprimovaným spôsobom. Parser údajov H2O má zabudovanú inteligenciu na odhadnutie schémy prichádzajúceho súboru údajov a podporuje prijímanie údajov z viacerých zdrojov v rôznych formátoch (CSV, Excel, XML).

Rozhranie REST API H2O umožňuje prístup ku všetkým možnostiam H2O z externého programu alebo skriptu prostredníctvom JSON cez HTTP. Toto rozhranie využíva webové rozhranie H2O (Flow UI) s prepojením na R (R Core Team, 2022) (H2O-R) alebo Python (H2O-Python).

FEATURE ENGINEERING

Feature Engineering alebo tiež inžinierstvo parametrov IP je proces vytvárania alebo transformácie premenných v ML s cieľom zlepšiť jeho výkon. Tento proces zahŕňa výber relevantných informácií zo surových údajov a ich transformáciu do formátu, ktorý je pre model ľahko zrozumiteľný. Cieľom je poskytnúť modelu zmyslupnnejšie a relevantnejšie informácie, čo vedie k zvýšeniu jeho presnosti. Kvalita funkcií použitých na tréning modelov ML je kľúčová pre ich úspech. Feature Engineering poskytuje techniky na vytváranie nových premenných z existujúcich údajov. Tieto techniky pomáhajú identifikovať dôležité vzory a vzťahy v údajoch, čo zlepšuje efektivitu učenia

modelu zo vstupných údajov. Feature sú individuálne merateľné vlastnosti údajov, ktoré sa používajú ako vstupy do algoritmov ML. Môžu byť číselné, kategorické alebo textové a predstavujú rôzne aspekty údajov relevantné pre daný problém.

V príspevku boli použité z meraných premenných: teplota vody v rieke T_o ako závislá premenná a teplota vzduchu T_a ako prediktor, okrem tej boli medzi prediktory zahrnuté parametre mesiac a týždeň roka, v ktorom bolo konkrétne meranie uskutočnené, pričom tieto boli transformované na „Faktor“. Faktory v R sú dátové štruktúry, ktoré sa používajú na reprezentáciu a kategorizáciu kategorických dát. Kategorické dáta sú premenné, ktoré nadobúdajú obmedzený počet rôznych hodnôt. Faktory môžu ukladať celé čísla a reťazce a majú atribút „levels“, ktorý obsahuje všetky možné hodnoty faktora. Ďalej boli použité dve premenné generované z T_a . Konkrétne T_{an} , kde parameter n predstavuje n -denný pohyblivý priemer a druhou premenou je predikovaná T_{exp} pomocou metódy exponenciálneho vyhladzovania časových radov, ktorá sa používa na predpovedanie budúcich hodnôt na základe histórie meraných údajov. Táto metóda priradzuje väčšiu váhu novším pozorovaniam a menšiu váhu starším pozorovaniam, pričom váha exponenciálne klesá s vekom pozorovania. Konkrétne, príkazom `ets()` v prostredí R vytvorí nový stĺpec T_{exp} , ktorý obsahuje prispôbené hodnoty z modelu exponenciálneho vyhladzovania (ETS) aplikovaného na stĺpec T_a . Tieto prispôbené hodnoty sú vlastne jednodukové predpovede, ktoré sú založené na histórii meraných údajov v stĺpci T_a . V druhom kroku sme pridali medzi premenné ešte parameter Q_d denné prietoky, ale tak isto sme ju transformovali konkrétne na Q_{dn} , kde parameter n predstavuje n -denný pohyblivý priemer.

V tomto článku sme použili H2O ML aplikované v prostredí programovacieho jazyka R v prostredí Rstudio (RStudio Team, 2020). Rstudio je platforma, ktorá poskytuje rôzne open source balíky a nástroje, ktoré neslúžia len na samotné modelovanie, ale a aj na následnú štatistickú analýzu a grafickú prezentáciu výsledkov.

V prvom kroku je potrebná kontrola kvality údajov a neprerušenosti časových radov (chýbajúce údaje), následne boli vygenerované nové premenné. Ďalej bola potrebná transformácia dát z tabuľkovej formy na formu z H2O prostredia. Následne je potrebné si rozdeliť dáta na tréningové a testovacie sady, v tomto prípade sú delené v pomere 80/20. Modelu sme zadefinovali závislú premennú a prediktory, teda premenné, na základe ktorých ju budeme modelovať. Následne bol spustený model, kde prediktormi boli: mesiac, týždeň (v roku), Ta , Tan a $Taexp$ a v modeli bola aplikovaná 5 a 10 stupňová krížová validácia.

Samotná krížová validácia spočíva v rozdelení tréningového súboru údajov na podmnožiny, v našom prípade na 5, resp. 10, kde jedna podmnožina slúži ako testovacia množina. Ostatné podmnožiny slúžia ako tréningové množiny. Klasifikátor trénuje model na tréningovej množine a testovaciu množinu používa na testovanie presnosti a výkonnosti modelu. Tento proces sa opakuje niekoľkokrát, pričom tréningovú a testovaciu množinu tvorí vždy iná podmnožina. V prípade premennej Tan boli testované viaceré nastavenia kľzavého priemeru a to 2, 3, 5, 7, 10, 12 dní. Po vyhodnotení bol v ďalšom kroku z prediktorov vyradený mesiac a nahradil ho Qdn n -denný kľzavý priemerný prietok a použitá bola už len 10 stupňová krížová validácia.

VÝSLEDKY

Sofvérový balík H2O ML poskytuje možnosť nastavenie výstupu pre viaceré parametre výkonu daných modelov. V tejto práci boli porovnávané nasledovné parametre:

R2 (Koefficient determinácie) - Hodnota R2 predstavuje mieru, v akej sa predpovedaná hodnota a skutočná hodnota pohybujú súčasne. Hodnota R2 sa pohybuje medzi 0 a 1, kde 0 predstavuje žiadnu koreláciu medzi predpovedanou a skutočnou hodnotou a 1 predstavuje úplnú koreláciu.

MSE (Priemerná kvadratická chyba) - Metrika MSE meria priemer štvorcov, chýb alebo odchýlok. MSE berie vzdialenosti od bodov k regresnej línii (tieto vzdialenosti sú „chyby“) a odstraňuje akékoľvek záporné znamienka pomocou druhej mocniny. MSE zahŕňa aj variáciu a skreslenie prediktora. MSE tiež dáva väčšiu váhu väčším rozdielom. Čím väčšia je chyba, tým viac je penalizovaná. Čím menšia je MSE, tým lepší je výkon modelu.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (1)$$

kde N je celkový počet pozorovaní vo vašom príslušnom dátovom súbore, y_i je meraná hodnota, \hat{y}_i je predpovedaná hodnota.

RMSE (Koreň z priemernej kvadratickej chyby) - Metrika RMSE hodnotí, ako dobre môže model predpovedať kontinuálnu hodnotu. Jednotky RMSE sú rovnaké ako predpovedaný cieľ. Čím menšia je RMSE, tým lepší je výkon modelu.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N \sum (y_i - \hat{y}_i)^2}}, \quad (2)$$

kde N je celkový počet pozorovaní vo vašom príslušnom dátovom súbore, y_i je meraná hodnota, \hat{y}_i je predpovedaná hodnota.

RMSLE (Koreň z priemernej kvadratickej logaritmickej chyby) je metrika, ktorá meria pomer medzi skutočnými hodnotami a predpovedanými hodnotami. Táto metrika vypočíta logaritmus predpovedaných a skutočných hodnôt a následne vypočíta kvadratickú chybu týchto logaritmických hodnôt.

$$RMSLE = \sqrt{\frac{1}{N \sum (\ln(y_i+1) - \ln(\hat{y}_i+1))^2}}, \quad (3)$$

kde: N je celkový počet pozorovaní vo vašom príslušnom dátovom súbore, y_i je meraná hodnota, \hat{y}_i je predpovedaná hodnota.

MAE (Priemerná absolútna chyba) - Priemerná absolútna chyba je priemer absolútnych chýb. Jednotky MAE sú rovnaké ako predpovedaný cieľ, čo je užitočné pre pochopenie. Čím menšia je MAE, tým lepší je výkon modelu.

$$MAE = \frac{1}{N \sum |x_i - \hat{x}_i|}, \quad (4)$$

kde: N je celkový počet chýb, x_i sú merané hodnoty, \hat{x}_i sú predpovedané hodnoty a tento vzorec vypočíta priemernú absolútnu hodnotu rozdielov medzi skutočnými a predpovedanými hodnotami.

VÝSTUPY Z MODELOV

Ako už bolo spomenuté, modelovanie prebehlo v dvoch krokoch. V prvom kroku bolo použitých 5 premenných, pričom pri premennej Tan bol menený počet dní, z ktorých sa počítal kľzavý priemer a to 2, 3, 5, 7, 10 a 12 dní. Ostatné premenné boli pre všetky spustenia modelu rovnaké. Ďalej bol testovaný vplyv cross validácie na výstupy z modelov. Čo sa týka parametru krížovej validácie pre všetky alternatívy Tan , výstup s použitím 10 stupňovej CV bol vždy lepší ako pri použití 5 stupňovej CV. Čo sa týka parametra Tan , teda kľzavého priemeru denných teplôt vzduchu, najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri 10 dňovom kľzavom priemere. Tieto výsledky sú zosumarizované v Tab 1. V druhom kroku bola vypustená premenná „Mesiac“ a nahradila ju premenná Qdn , teda kľzavý priemer denných prietokov za n dní. V tomto prípade parameter Tan bol ponechaný na 10 dňoch a testovaná bola zmena u premennej Qdn , konkrétne 5, 7, 10 a 12 dní a následne ešte 15 dní.

V tomto kroku bolo dosiahnuté ešte nepatrné zlepšenie, a to pri doplnení o 15 dňový kľzavý priemer, pri ktorom boli dosiahnuté najlepšie hodnoty štatistík (Tab. 2). Treba poznamenať, že s výnimkou Qdn 15 dní bol pri ostatných spusteniach parameter Tan ponechaný na 10 dňoch a až v prípade Qdn 15 bol parameter Tan upravený na rovnaký počet dní. Po tomto kroku boli ešte otestované dané modely. Test spočíval vo vylúčení dát z roku 2019, kedy tieto dáta neboli ani medzi testovacími ani tréningovými dátami. V Tab. 3 je porovnanie štatistík z tréningovania modelu výstupu pre roky, s ktorými model pracoval a predikcia To pre rok 2019 a následne predikcia pre kompletne dáta.

Tabuľka 1. Štatistické parametre pre dané konfigurácie parametrov.

Table 1. Statistical parameters for given parameter configurations.

	5 stupňová crossvalidácia					10 stupňová crossvalidácia					
	Tan					Tan					
	2 dni	3 dni	5 dní	7 dní	10 dní	2 dni	3 dni	5 dní	7 dní	10 dní	12 dní
MSE	1,244	0,939	0,675	0,474	0,427	1,240	0,951	0,650	0,512	0,411	0,462
RMSE	1,115	0,969	0,822	0,689	0,653	1,110	0,975	0,811	0,716	0,641	0,681
R2	0,973	0,979	0,985	0,989	0,991	0,973	0,979	0,985	0,989	0,991	0,990
MAE	0,848	0,741	0,626	0,527	0,491	0,851	0,741	0,616	0,543	0,481	0,514
RMSLE	0,200	0,190	0,154	0,127	0,126	0,203	0,185	0,151	0,134	0,119	0,119

Tabuľka 2. Štatistické parametre pre dané konfigurácie parametrov.

Table 2. Statistical parameters for given parameter configurations.

	10 stupňová crossvalidácia				
	Qdn				
	5 dní	7 dní	10 dní	12 dní	15 dní
MSE	0,172	0,100	0,105	0,098	0,079
RMSE	0,415	0,317	0,325	0,313	0,281
R2	0,996	0,998	0,998	0,998	0,998
MAE	0,318	0,238	0,246	0,237	0,211
RMSLE	0,009	0,066	0,071	0,068	0,060

Tabuľka 3. Štatistické parametre pre model, testovanie vynechania údajov z roku 2019.

Table 3. Statistical parameters for the model, testing the omission of 2019 data.

	2006 – 2020	2006 – 2020 bez 2019	2019
MSE	0,069	0,096	0,434
RMSE	0,263	0,310	0,658
R2	0,998	0,998	0,988
MAE	0,201	0,233	0,511
RMSLE	0,059	0,060	0,098

Po tomto kroku bol z údajov vylúčený rok 2019, zvyšné roky boli rozdelené v pomere 80/20 % na tréningové a testovacie dáta. Následne bol spustený a natrénovaný model, ktorý bol použitý na predikciu hodnôt T_o pre rok 2019. Vzájomné porovnanie štatistických parametrov nájdeme v Tab. 3, kde v prvom stĺpci sú štatistické parametre, kedy model pracoval s celým rozsahom dát. V druhom stĺpci sú parametre v prípade vylúčenia roku 2019 a v poslednom stĺpci sú štatistické parametre modelu. Použitý model na rok 2019 bol z dát vynechaný.

Na Obr. 4 môžeme vidieť závislosť teploty vzduchu a teploty vody v rieke. Zelenou farbou sú merané hodnoty a modrou farbou predpovedané hodnoty pre rok 2019. Ako vidíme, teploty vody predpovedané modelom sú mierne vyššie v prípade nízkych, resp. vysokých teplôt. Na Obr. 5 vidíme porovnanie meraných a predpovedaných hodnôt T_o pre rok 2019, kde T_o je meraná hodnota a $Topredict1$ je výstup z modelu, ktorý pracoval s celým rozsahom meraní. $Topredict2$ je predpoveď pre rok 2019 z modelu, v ktorom

sme vylúčili dáta pri jeho tréningu. Ako môžeme vidieť aj v Tab. 3, v prípade predikcie sa pre rok 2019 zhoršila predpoveď v štatistike MAE z hodnoty 0,201 °C, resp. 0,232 °C na hodnotu 0,511 °C.

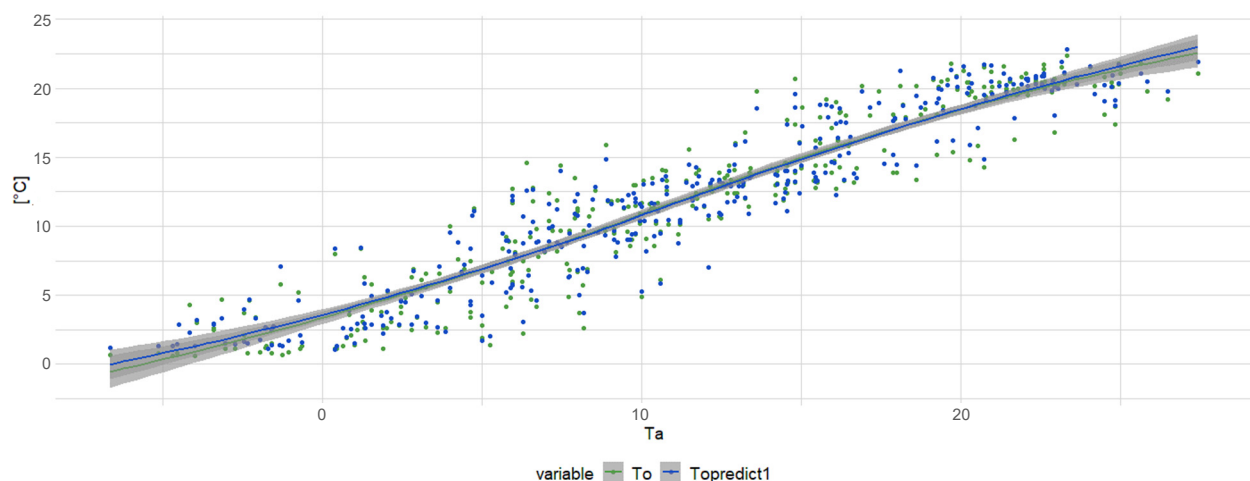
Na Obr. 6 sú zobrazené priemerné mesačné hodnoty T_a a T_o pre celé obdobie 2006–2020 spolu s predpovedanou hodnotou $Topredicted$, kde môžeme vidieť predpovedanú hodnotu T_o , ktorá kopíruje trend meranej hodnoty.

ZÁVER

V príspevku bol použitý H2O AutoML, algoritmus na automatické strojové učenie, ktorý je súčasťou platformy strojového učenia H2O. Okrem toho sa príspevok zamerával na vplyv IP v spresnení modelov H2O ML, pričom boli testované ako prediktory rôzne merané aj generované premenné a tiež kategorické premenné. Ich kombinácia viedla k zlepšeniu predpovedí modelu. Významným faktom je, že v porovnaní s inými metódami venujúcimi sa predikcii

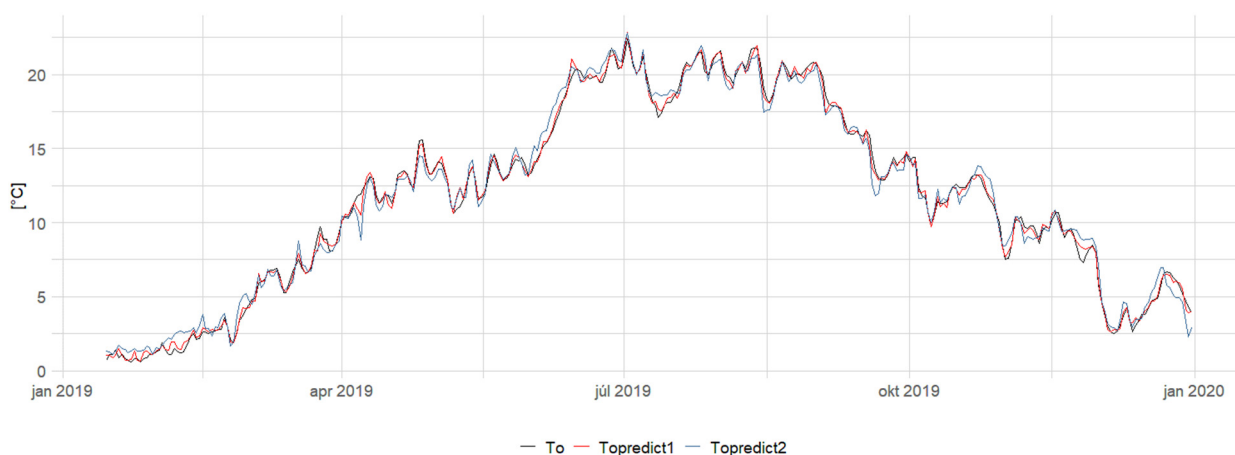
Obrázok 4. Namerané a predikované hodnoty T_o pre rok 2019 a teploty vzduchu T_a .

Figure 4. Observed and predicted values of T_o for 2019 and air temperature T_a .



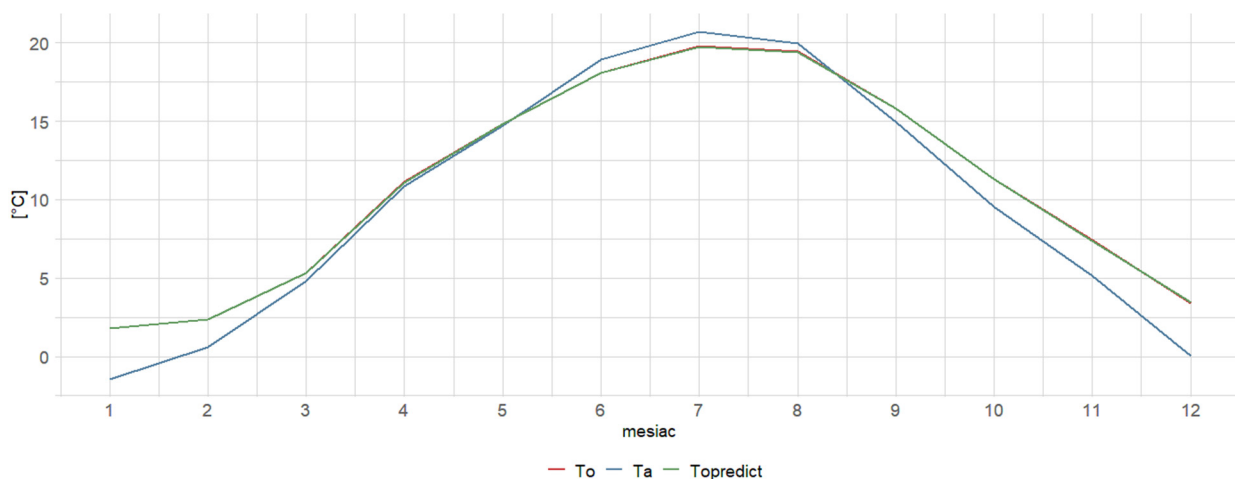
Obrázok 5. Porovnanie predpovedaných hodnôt Topredict1 a Topredict2 s meranou hodnotou To.

Figure 5. Comparison of predicted values of Topredict1 and Topredict2 with measured value of To.



Obrázok 6. Porovnanie priemerných mesačných hodnôt To a Ta s predpovedanou priemernou mesačnou hodnotou Topredicted.

Figure 6. Comparison of average monthly values of To and Ta with predicted average monthly value of To predicted.



teploty vody v tokoch, ktoré dosahujú predpovede porovnateľnej presnosti, sú tieto metódy závislé na ďalších meraných veličinách, ako napríklad zrážky alebo intenzita globálneho žiarenia, ktoré nemusia byť vždy pre danú oblasť dostupné. Je predpoklad, že by postup popísaný v tomto príspevku podával veľmi podobné výsledky, aj keby sme na predikciu teploty vody v toku použili ako jedinú meranú veličinu teplotu vzduchu. Cieľom ďalšieho výskumu bude verifikácia tohto predpokladu, ako aj aplikácia na rôznych veľkostiach a typoch tokov a tiež možnosti aplikovať tieto modely spätne, napríklad na dopĺňanie chýbajúcich údajov.

Podakovanie

Táto práca bola podporená projektami VEGA No. 2/0015/23; APVV-20-0374 and WATSIM „Water temperature simulation during summer low flow conditions in the Danube basin“.

LITERATÚRA

- Bajtek, Z.–Pekárová, P.–Jeneiová, K.–Ridzoň, J., 2022, *Analysis of the water temperature in the Litava River. Acta Hydrol. Slovaca* 23, 296–304.
<https://doi.org/10.31577/ahs-2022-0023.02.0034>
- Feigl, M.–Lebiedzinski, K.–Herrnegger, M.–Schulz, K., 2021, *Machine-learning methods for stream water temperature prediction. Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, 2951–2977.
<https://doi.org/10.5194/hess-25-2951-2021>
- LeDell, E.–Poirier, S., 2020, *H2O AutoML: Scalable Automatic Machine Learning. 7th ICML Workshop Autom. Mach. Learn. AutoML.*
- Madni, H.–Umer, M.–Ishaq, A.–Abuzinadah, N.–Saidani, O., Alsubai, S.–Hamdi, M.–Ashraf, I., 2023, *Water-Quality Prediction Based on H2O AutoML and Explainable AI Techniques. Water* 15, 475.
<https://doi.org/10.3390/w15030475>
- Mohseni, Stefan, H.G., 1998, *Stream temperature/air temperature relationship: A physical interpretation.*

- Morrill, J.C.–Bales, R.C.–Conklin, M.H., 2005, *Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for Future Water Quality*. *J. Environ. Eng.* 131, 139–146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:1\(139\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:1(139))
- Pekárová, P.–Bajtek, Z.–Pekár, J.–Výleta, R.–Bonacci, O.–Miklánek, P.–Belz, J.U.–Gorbachova, L., 2023, *Monthly stream temperatures along the Danube River: Statistical analysis and predictive modelling with incremental climate change scenarios*. *J. Hydrol. Hydromech.* 71, 382–398. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0028>
- Považanová, B.–Čistý, M.–Bajtek, Z., 2023, *Using feature engineering and machine learning in FAO reference evapotranspiration estimation*. *J. Hydrol. Hydromech.* 71, 425–438. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0032>
- R Core Team, 2022. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rajesh, M.–Rehana, S., 2021, *Prediction of river water temperature using machine learning algorithms: a tropical river system of India*. *J. Hydroinformatics* 23, 605–626. <https://doi.org/10.2166/hydro.2021.121>
- RStudio Team, 2020, *RStudio: Integrated Development Environment for R*. RStudio, PBC., Boston, MA.
- Souaissi, Z.–Ouarda, T.–St-Hilaire, A., 2023, *Non-parametric, semi-parametric, and machine learning models for river temperature frequency analysis at ungauged basins*. *Ecol. Inform.* 75, 102107. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102107>
- Toffolon, M.–Piccolroaz, S., 2015, *A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge*. *Environ. Res. Lett.* 10, 114011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/114011>
- Wade, J.–Kelleher, C.–Hannah, D., 2023, *Machine learning unravels controls on river water temperature regime dynamics*. *J. Hydrol.* 623, 129821. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129821>
- Zhu, S.–Bonacci, O.–Oskoruš, D.–Hadzima-Nyarko, M.–Wu, S., 2019, *Long term variations of river temperature and the influence of air temperature and river discharge: case study of Kupa River watershed in Croatia*. *J. Hydrol. Hydromech.* 67, 305–313. <https://doi.org/10.2478/johh-2019-0019>

BIOMONITORING PRÍZEMNÉHO OZÓNU VO VYSOKÝCH TATRÁCH

SVETLANA VARŠOVÁ¹, VERONIKA LUKASOVÁ¹, MILAN ONDERKA^{1,2}, DUŠAN BILČÍK¹

¹ Ústav vied o Zemi SAV vied, v.v.i., Dúbravská cesta 9, 840 05 Bratislava

² Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

Korešpondenčný autor: Svetlana Varšová (geofsvet@savba.sk)

*The concentration of ground-level ozone (O_3) and derived O_3 metrics for assessing the adverse impact of O_3 on vegetation are important parts of air quality monitoring. Measurement of O_3 concentration is usually carried out by using standard automatic analysers, however, the limitation due to demanding operating conditions in complex terrain evoked the need for using alternative passive methods based on the diffusion of ambient air into special passive samplers. In this work, we present the example of the integration of the passive diffusion sampler (P) into automatic measurement (A) to calculate O_3 metrics (exposure index AOT40, and modelled ozone dose MO_3D or $PODy$). Passive monitoring was carried out with the use of an O_3 -sensitive indigo filter (IF) placed into newly developed holder with protection against wind and rainfall effects. Experimental passive IF samplers were located in the meteorological booth at Observatory Skalnaté Pleso (ObSP) in High Tatra Mts where control automatic active O_3 measurement was running at the same time. The time of exposure reflected the growing season (GS) length as the period without snow cover occurrence (June – September 2023). After field exposition and following photometric laboratory analysis of IF, the seasonal values of aggregated AGG- O_3 (P) and the average AVG- O_3 (P) concentrations were derived based on the calibration equation. Both values were approximately 7% higher than AGG- O_3 (A) and AVG- O_3 (A) derived from the active measurement. A comparison of O_3 metrics showed a substantially higher difference for AOT40 (42.4%) than for MO_3D (6.4%) when using AVG- O_3 (P) instead of the measured 1h O_3 concentration (A). The passive IF method can therefore be considered an acceptable alternative for MO_3D modelling, on the contrary, the higher level of uncertainty significantly limits the use of the passive IF samplers for calculating AOT40. The biological response to the oxidising effect of O_3 was tested on needle samples of dwarf mountain pine (*Pinus mugo*), the dominant tree species of the alpine ecotone zone in the High Tatras. In laboratory conditions, we tested the oxidative stability (OxS) of plant material for different levels of ozonation. Based on the relationship between OxS and AGG- O_3 , an interval of $11.9 \text{ mmol m}^{-2} \leq MO_3D \leq 33.3 \text{ mmol m}^{-2}$ was projected for the range $0 \geq OxS \geq -0.05$ with minimal harmful O_3 effect. MO_3D based on standard (10.9 mmol m^{-2}), as well as passive (11.6 mmol m^{-2}) O_3 measurements for the 2023 vegetation period, did not exceed the indicated projected level, therefore mountain pine can be considered to be the tree with relatively good resistance to O_3 pollution at higher altitudes in the High Tatras.*

*Koncentrácia prízemného ozónu (O_3) a odvodené metriky pre hodnotenie škodlivého účinku O_3 na vegetáciu sú dôležitou súčasťou monitoringu kvality ovzdušia. Na meranie koncentrácie O_3 sa štandardne používajú automatické analyzátory, avšak technické obmedzenia pre ich použitie v terénnych podmienkach vyvolali požiadavku na meranie pomocou alternatívnych tzv. pasívnych metód založených na voľnej difúzii okolitého vzduchu do špeciálnych vzorkovačov. V tejto práci uvádzame príklad kombinácie aktívneho (A) a pasívneho (P) spôsobu merania pre potreby výpočtu O_3 metrik, ako sú expozičný index AOT40 a modelovaná ozónová dávka MO_3D , resp. $PODy$. Na pasívny monitoring boli použité O_3 -senzitivné indigové filtre (IF) umiestnené v novo vyvinutom držiaku s ochranou proti vetru a vymývaniu zrážkami. Pasívne IF vzorkovače boli exponované vo Vysokých Tatrách v blízkosti observatória pri Skalnatom plese (ObSP), kde súčasne prebiehalo aj meranie O_3 pomocou automatického analyzátora. Doba expozície zodpovedala vegetačnému obdobiu bez výskytu snehovej pokrývky (jún – september 2023). Po ukončení expozície a následnej fotometrickej laboratórnej analýze IF boli podľa kalibračnej rovnice vypočítané sezónne hodnoty pre agregovanú AGG- O_3 (P) a priemernú AVG- O_3 (P) koncentráciu. Obe hodnoty prevýšili príslušné charakteristiky z automatického merania AGG- O_3 (A) a AVG- O_3 (A) približne o 7%. Porovnanie O_3 metrik s použitím AVG- O_3 (P) a 1h koncentrácií O_3 z automatického merania (A) poukazuje na podstatne vyšší rozdiel pre AOT40 (42.4%) ako pre MO_3D (6.4%). Pasívnu IF metódu preto možno považovať za akceptovateľnú alternatívu pre modelovanie MO_3D , naopak, vyššia miera neistoty výrazne limituje použitie pasívnych IF snímačov pre výpočet AOT40. Biologická odozva rastlinného materiálu na O_3 bola sledovaná na vzorkách ihličia borovice horskej (*Pinus mugo*), ktorá je dominantnou drevinou alpskej ekotónovej zóny vo Vysokých Tatrách. V laboratórnych podmienkach sme testovali oxidačnú stabilitu (OxS) rastlinného materiálu pre rôzne úrovne ozonizácie. Na základe zisteného vzťahu medzi OxS a AGG- O_3 bola pre interval $0 \geq OxS \geq -0,05$ projektovaná úroveň ozónových dávok $11,9 \text{ mmol m}^{-2} \leq MO_3D \leq 33,3 \text{ mmol m}^{-2}$ s minimálnym škodlivým účinkom O_3 . MO_3D odvodené na základe štandardného ($10,9 \text{ mmol m}^{-2}$) ako i pasívneho ($11,6 \text{ mmol m}^{-2}$) merania O_3 pre vegetačné obdobie 2023 neprekročili uvedenú projektovanú úroveň, preto možno borovicu horskú považovať za drevinu s pomerne dobrou odolnosťou voči O_3 znečisteniu vo vyšších polohách Vysokých Tatier.*

Key words: ozone dose, indigo passive sampler, oxidative stability, *Pinus mugo*

1 ÚVOD

Prízemný ozón (O_3) je dôležitou súčasťou monitoringu kvality ovzdušia. Dlhodobé pôsobenie O_3 môže mať škodlivý účinok na ľudské zdravie i vegetáciu. Vplyv O_3 na vegetáciu

sa podľa platnej európskej smernice EU (2008) hodnotí na základe merania koncentrácie O_3 s vyjadrením expozičného indexu AOT40, pričom sa sleduje prekročenie cieľovej hodnoty a dlhodobého cieľa. V posledných rokoch je pri hodno-

tení uprednostňovaný indikátor fyto toxickéj ozónovej dávky (PODy), založený na modelovaní stomatálneho toku O₃, ktorý preniká cez otvorené prieduchy do asimilačných orgánov rastlín (Mills et al., 2011). Výpočet obidvoch metrík AOT40 i PODy si vyžaduje kvalitné údaje zo štandardných O₃ analyzátorov s nepretržitým meraním a záznamom koncentrácie O₃ v hodinovom kroku. Použitie takýchto zariadení v terénnych podmienkach má určité obmedzenia, preto boli na stanovenie expozície O₃ vyvinuté alternatívne tzv. pasívne snímače (Krupa et al., 2001; Yuska, 2003; Maruo et al., 2009). V porovnaní s aktívnymi monitormi sú síce cenovo dostupnejšie, menej náročné na prevádzku, avšak poskytujú iba časovo agregované hodnoty koncentrácie O₃ s menšou presnosťou (Pitar et al., 2018). Kombináciou aktívneho a pasívneho spôsobu merania by bolo možné získať reprezentatívne údaje o expozícii O₃ na viacerých miestach v teréne v čase vegetačnej sezóny, kedy je príjem O₃ vegetáciou najintenzívnejší.

Vplyv O₃ na rastlinu okrem úrovne expozície O₃ závisí taktiež od citlivosti jednotlivých rastlinných druhov na oxidačný stres vyvolaný O₃. Pre vyhodnotenie škodlivosti expozície O₃ je nevyhnutné stanoviť vzťah medzi O₃ metrikou odvodenou z meraní koncentrácie O₃ v teréne a biologickou zmenou organizmu, podľa ktorého je možné určiť tzv. kritickú úroveň. Určenie kritickej úrovne vychádza predvažne z experimentov v kontrolovaných podmienkach ako napr. FACE (Free Air Controlled Exposure), ktoré sledujú fyziologickú odozvu rastlín na zvýšenú fumigáciu O₃ v otvorených komorách (Paolletti et al., 2016). Vzhľadom k výskytu možných neistôt vyplývajúcich z rozdielnych podmienok v kontrolovanom a voľnom priestore (Fuhrer et al., 1997) je dôležité skúmať biologickú odozvu vegetácie aj v jej prirodzenom prostredí (Sicard et al., 2016).

V našej práci sme sa zamerali na biomonitoring O₃ v alpskej ekotónovej zóne Vysokých Tatier s dominantným rozšírením borovice horskej - kosodreviny (*Pinus mugo*). Hlavným cieľom bolo overiť možnosť použitia pasívnej indigovej metódy pre výpočet O₃ metrík a preskúmať biologickú odozvu borovice horskej na O₃ expozíciu vo vysokohorskom prostredí. Podľa našich poznatkov, škodlivý účinok O₃ na porasty borovice horskej v jej prirodzenom prostredí nebol doteraz preskúmaný, prezentovaný výskum tak môže poskytnúť cenné údaje o biologickú odozvu vegetácie na O₃ znečistenie vo vyšších horských polohách.

2 METODIKA A ÚDAJE

2.1 Výskumná plocha

Skúmaná oblasť sa nachádza v alpskom ekotónovom pásme Vysokých Tatier, ktorej súčasťou je observatórium pri Skalnatom plese (ObSP), (49,18928°N, 20,23410°E, 1778 m n. m.), (Obr. 1a). Na ObSP sú od roku 1943 nepretržite vykonávané klimatické pozorovania a od roku 2000 aj merania koncentrácie O₃. V poslednom normálovom období 1991–2020 priemerná ročná teplota vzduchu dosiahla hodnotu 2.8 °C a atmosférické zrážky s normálovým ročným úhrnom 1477 mm boli pozorované v priemere 154 dní v roku (Lukasová et al., 2023). Priemerné koncentrácie O₃ v období vegetačnej aktivity (April–September) kolíšu

okolo 51,6 ppb a maximálne hodinové hodnoty často prekračujú úroveň 90 ppb (Lukasová et al., 2022). V okolí ObSP je rozšírená borovica horská, ktorá je dominantnou drevinou subalpínskeho pásma medzi 1500 až 1800 m n. m. Borovica horská je v tejto štúdií považovaná za hlavný bioindikátor pôsobenia O₃ na vysokohorskú vegetáciu.

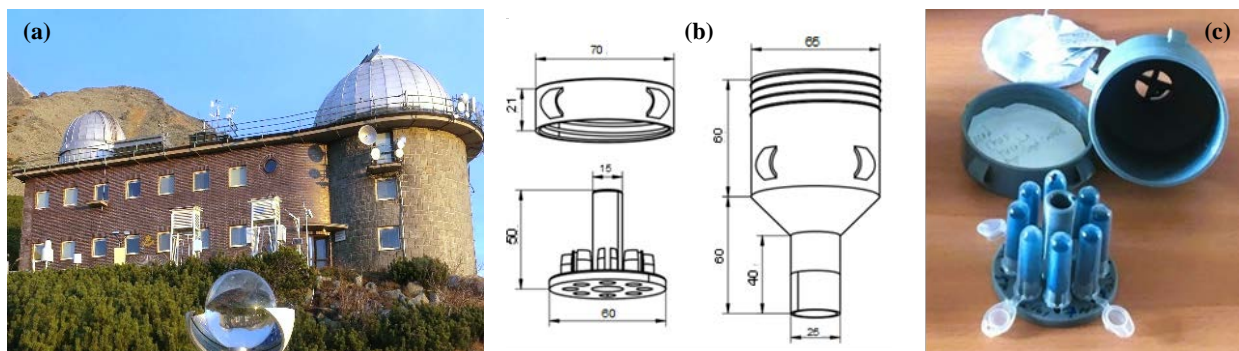
2.2 Monitoring koncentrácie O₃ – aktívny a pasívny spôsob merania

Koncentrácia O₃ sa štandardne meria pomocou automatických analyzátorov, ktoré pracujú na princípe absorpcie UV žiarenia molekulami O₃ pri vlnovej dĺžke 254 nm. Vyjadrenie hodnoty koncentrácie O₃ vychádza z Lambert-Beerovho zákona, ktorý matematicky definuje vzťah medzi zmenou žiarivého toku a koncentráciou látkového množstva absorbujúcej zložky. Ide o tzv. aktívny spôsob, kde meranie O₃ vyžaduje kontinuálny a kontrolovaný prívod vzduchu z okolitého priestoru, pričom na prevádzku je potrebné zabezpečiť zdroj energie a umiestnenie zariadenia v klimatizovaných priestoroch. V našom experimente bol na aktívny monitoring využitý O₃ analyzátor typu Thermo Scientific 49C Ozone Monitor s automatickým záznamom koncentrácie O₃ (ppb) v hodinovom kroku. Prístroj bol umiestnený v budove ObSP so zabezpečením prívodu vzduchu z vonkajšieho prostredia.

Metódy pasívneho monitoringu kvality ovzdušia sú vo všeobecnosti založené na chemickej reakcii aktívnej látky impregnovanej na vhodnom nosiči, ktorá pri expozícii vo vonkajšom prostredí selektívne reaguje so sledovaným plyným polutantom. V tejto práci sme využili selektívnu reakciu indiga s ozónom: $C_{16}H_{10}N_2O_2 + O_3 \rightarrow 2 C_8H_5NO_2 + O$, kde O₃ pôsobí ako silné oxidačné činidlo so schopnosťou štiepiť molekulu indiga na dve molekuly izatínu (Maruo et al., 2009). Ako aktívna látka bola použitá zlúčenina indigokarmín ($C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$, CAS 860-22-0). Ide o organickú soľ, ktorá vzniká po aromatickej sulfonácii indiga s cieľom dosiahnuť lepšiu rozpustnosť indigovej zložky vo vode. Aktívna látka bola fixovaná na chromatografický papier typu Whatman 3001-653, a to vo forme vodného roztoku s nasledovným zložením: 0,45 g indigokarmín (0,9 %) + 3,5 g kyselina citrónová (7,0 %) + 12,5 g glykol (25,0 %) + 33,55 g destilovaná H₂O (67,1 %), (Maruo et al., 2009). Na laboratórnych váhach Libra s presnosťou 0,001g bolo do mikroskúmavky typu Eppendorf s objemom 1,5 ml pomocou injekčnej striekačky po kvapkách navážené presné množstvo roztoku indiga 0,100 ± 0,001 g, ktorý vztláním prešiel na vložený chromatografický papier rozmeru štvorca s veľkosťou 2,5 x 2,5 cm. Po voľnom vysušení impregnovaného filtra (IF) do konštantnej hmotnosti boli mikroskúmavky uzavreté a do začiatku vonkajšej expozície uskladnené na tmavom mieste pri izbovej teplote. Na začiatku vonkajšej expozície boli mikroskúmavky s IF umiestnené v špeciálnom držiaku vyrobenom pomocou 3D tlače (Obr. 1b, c). Držiak má v hornej časti nepriepustné veko so závitom a v spodnej časti kónický tvar pre ochranu pred vymytím aktívnej látky pri intenzívnych dažďoch. Pasívne snímače boli počas expozície umiestnené v štandardnej meteorologickej búdke na ObSP. Koncentrácia O₃ bola paralelne monitorovaná pasívnym i aktívnym spôsobom.

Obrázok 1. Observatórium pri Skalnatom plese (ObSP) – výskumná plocha na meranie koncentrácie O_3 aktívnym i pasívnym spôsobom (a); schéma vzorkovača na pasívny monitoring O_3 (b) pomocou indigových filtrov (IF) umiestnených v mikroskú-mavke typu Eppendorf (c).

Figure 1. Observatory Skalnaté Pleso (ObSP) – a study area for measuring O_3 concentrations by both, active and passive methods (a); scheme of sampler used for passive O_3 monitoring (b) based on indigo filters (IF) placed in an Eppendorf microtube (c).



Doba expozície (jún – september 2023) zodpovedá obdobiu bez výskytu snehovej pokrývky v alpínskej ekotónovej zóne.

Po ukončení expozície boli IF podrobené laboratórnej analýze. V prvom kroku došlo k rozpusteniu reakčného produktu, a to výluhovaním IF v 10 ml destilovanej H_2O . Ďalej nasledovalo meranie absorbancie výluhu pomocou prenosného fotometra WTW typu pFotoFlex® STD, pri vlnovej dĺžke 517 nm (A-517nm). Na základe nameranej hodnoty A-517nm bola podľa kalibračnej rovnice vypočítaná agregovaná koncentrácia AGG- O_3 (ppm). Kalibračný vzťah medzi AGG- O_3 a A-517nm bol určený experimentálne v laboratórnych podmienkach. AGG- O_3 (ppm) predstavuje sumu priemerných hodinových koncentrácií O_3 pre definovaný počet hodín expozície. Pri určovaní kalibračnej závislosti bola sledovaná farebná odozva IF (A-517nm) na extrémne vysoké koncentrácie O_3 (cca 150 ppm) generované umelým zdrojom (prístroj Koizon 300, Gemke Technik GmbH) pre rôzne doby expozície (0, 0,5 h, 1 h, 1,5 h, 2 h). Koncentrácie O_3 použité pre výpočet kalibračných hodnôt AGG- O_3 boli merané pomocou aktívneho analyzátoru typu Thermo Scientific 49C.

2.3 Metriky odvodené z meraní koncentrácie O_3

Vplyv O_3 na vegetáciu sa v súčasnosti posudzuje podľa metrick AOT40 alebo MO_3D , resp. PODY. Expozičný index AOT40 predstavuje sumu kladných odchýlok 1h koncentrácií O_3 od referenčnej úrovne 40 ppb ($80 \mu g m^{-3}$) zaznamenaných počas dňa (od 8:00 do 20:00 h SEČ) v priebehu vegetačného obdobia (od 1. 5. do 31. 7. všeobecne pre vegetáciu a od 1. 4. do 30. 9. pre lesné dreviny). Cieľová hodnota pre ochranu vegetácie 9 ppm h ($18 000 \mu g m^{-3}$) sa vzťahuje k priemeru 5 za sebou idúcich kalendárnych rokov, dlhodobá cieľová hodnota je na úrovni 3 ppm h ($6 000 \mu g m^{-3}$, EU, 2008). Pre ochranu lesných ekosystémov bola stanovená kritická úroveň 5 ppm h ($10 000 \mu g m^{-3}$), (CLRTAP, 2017).

Vedeckou komunitou (Emberson et al., 2000; Karlsson et al., 2007; Ducker et al., 2018) je odporúčaná metrika fyto-toxickej ozónovej dávky (PODy). Koncept PODy je založený na výpočte stomatálneho toku O_3 s využitím multiplikatívneho algoritmu (Jarvis, 1976; Emberson et al., 2000).

Uvedený modelový mechanizmus okrem koncentrácie O_3 zohľadňuje aj vplyv ďalších meteorologických faktorov ako teplota vzduchu AT ($^{\circ}C$), sýtosťný doplnok VPD (kPa), slnečné globálne žiarenie R ($W m^{-2}$) alebo fotosyntetický aktívne žiarenie PAR ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$) a pôdny vodný potenciál SWP (MPa) na stomatálnu vodivosť rastliny. PODY ($mmol m^{-2}$) tak predstavuje sumu stomatálneho toku O_3 (Fst, $nmol m^{-2} s^{-1}$) po prekročení limitnej hodnoty Y. Pre lesné dreviny bola určená hodnota $Y = 1 nmol m^{-2} s^{-1}$ (CLRTAP, 2017) a to s ohľadom na prirodzenú detoxikačnú kapacitu lesných drevín. Navrhnutá kritická úroveň POD_1 pre smrek má hodnotu $9,2 mmol m^{-2}$ (CLRTAP 2017).

V tejto práci boli obidve metriky AOT40 i PODY vypočítané pomocou depozičného modelu DO_3SE (Deposition of Ozone for Stomatal Exchange, SEI, 2023) s parametrizáciou pre borovicu horskú (Bičárová et al., 2019). Modelovaná ozónová dávka (MO_3D , $mmol m^{-2}$) je totožná s modelovým výstupom POD_0 . Hodnota $Y = 0$ bola zvolená z dôvodu chýbajúcich údajov o detoxikačnej kapacite pre borovicu horskú, použitie POD_0 odporúča tiež Sicard et al. (2016). Doba expozície bola rovnaká ako v prípade expozície IF, t.j. od 1. júna do 30. septembra 2023. Do výpočtu MO_3D okrem koncentrácie O_3 vstupovali meteorologické údaje (teplota vzduchu, atmosférické zrážky, relatívna vlhkosť vzduchu, globálne žiarenie, tlak vzduchu a rýchlosť vetra) merané na ObSP pomocou automatickej stanice vybavenej datalogerom PROlog (Physicus, SK) s 10 minútovým záznamom nameraných údajov. Pre porovnanie aktívneho (A) a pasívneho (P) systému monitorovania O_3 boli vypočítané dve hodnoty MO_3D . V prvom prípade MO_3D (A) do výpočtu vstupovali hodinové koncentrácie O_3 zaznamenané automatickým analyzátorom. Pri druhom výpočte MO_3D (P) boli priemerné hodinové koncentrácie nahradené priemernou koncentráciou O_3 pre celé vegetačné obdobie $AVG-O_3(ppb) = AGG-O_3(ppm) * 1000 / \Sigma_{hod}$ na základe vyhodnotenia pasívnych IF exponovaných na ObSP počas vegetačného obdobia 2023. Podobným spôsobom boli vyhodnotené AOT40 (A) a AOT40 (P). Model DO_3SE pri výpočte 1h hodnôt Fst a OT40 (kladná odchýlka od referenčnej úrovne 40 ppb) rozlišuje dve výškové hladiny koncentrácie O_3 . Vstupné údaje koncentrácie O_3 v normalizovanej

výške merania (20 m) sú prepočítané na hladinu korunovej výšky pre daný typ dreviny (CLRTAP, 2017). Dá sa predpokladať, že pri korunovej výške borovice horskej (2 m) budú koncentrácie O₃ v tejto hladine nižšie ako vstupné údaje z aktívneho i pasívneho merania O₃. Presnosť výpočtu AOT40 môžu zásadným spôsobom ovplyvniť rozdiely v dennom chode O₃: variabilný pre AVG-O₃ (A) a vyrovnaný pre AVG-O₃ (P). Monitoring O₃ vo Vysokých Tatrách však ukázal, že s rastúcou nadmorskou výškou denná amplitúda O₃ postupne slabne a vo vyšších polohách na úrovni ObSP je denný chod O₃ pomerne vyrovnaný (Bičárová et al. 2005). Takmer konštantné koncentrácie počas dňa s miernym poklesom v dopoludňajších hodinách uvádzajú tiež Štefánik a Šedivá (2022) pre dve vysokohorské pozad'ové regionálne stanice (Chopok, 1958 m n. m. a Kojšovská hoľa, 1230 m n. m.). Štatistický softvér Statistica od Tibco bol použitý na analýzu vplyvu koncentrácie O₃ a meteorologických faktorov (AT, VPD, R alebo PAR, SWP) na stomatálny tok (Fst) a MO₃D.

2.4 Biomonitoring – oxidačná stabilita borovice horskej

Biologická odozva O₃ na vysokohorskú vegetáciu bola sledovaná na borovici horskej voľne rastúcej v alpínskom ekotónovom pásme. Citlivosť tejto dreviny na oxidačný stres sme testovali pomocou indikátora oxidačnej stability (OxS). Testovanie OxS sa uskutočnilo na vzorkách odobraných z troch dospelých jedincov v okolí ObSP na konci vegetačného obdobia 2023. Vzorka približne 20 ihličí bola po odbere zabalená do hliníkovej fólie a umiestnená do uzatvárateľného plastového vrečka. V priebehu toho istého dňa boli odobrané ihlice laboratórne spracované podľa postupu pre modifikovanú EL metódu (Bičárová et al., 2023). Metóda EL (electrolyte leakage) je založená na princípe kontroly úniku elektrolytu pri poškodení rastlinných buniek (Flint et al., 1967) a vychádza z predpokladu, že $EL(\%) = [(C_f - C_i) / (C_t - C_i)] \times 100$ je priamo úmerné poškodeniu bunkových membrán skúmaného rastlinného materiálu. Hodnoty C predstavujú nameranú elektrickú vodivosť pre ultračistú vodu (C_i) a vodný výluh vzorky pred (C_f) a po (C_t) úplnom kolapse bunkových membrán, ktorý sa očakáva po deštrukcii vzoriek v autokláve (121 °C, 20 min). Modifikácia pôvodnej metódy EL spočíva v tom, že vzorky ihličí sú pred vylúhovaním vystavené extrémne vysokým dávkam umelo generovaného O₃ v prietokovej laboratórnej komore. Sledujú sa hodnoty indexu poškodenia $INX = EL(\%)$ pre nulovú (INX₀) a rôzne úrovne expozície O₃ (INX-O₃). INX₀ je odvodený na základe regresného vzťahu medzi $y = INX-O_3$ a $x = AGG-O_3$ pre $x = 0$. Oxidačná stabilita je definovaná ako $OxS = INX_0 - INX-O_3$. Hodnoty OxS sa pohybujú v intervale od -1 do 1, OxS = 0 znamená, že rastlinné tkanivo je oxidačne stabilné, hodnoty OxS < 0 indikujú negatívny, resp. OxS > 0 pozitívny účinok ozonizácie na skúmaný rastlinný materiál. Prvé výsledky použitia modifikovanej EL metódy naznačili pomerne nízku citlivosť borovice horskej na oxidačný stres vyvolaný O₃ dávkami prijateľnými v prirodzenom prostredí (Bičárová et al., 2023). V tomto experimente sme preto vzorky vystavili podstatne vyšším dávkam, a to postupne pre 6 úrovní AGG-O₃

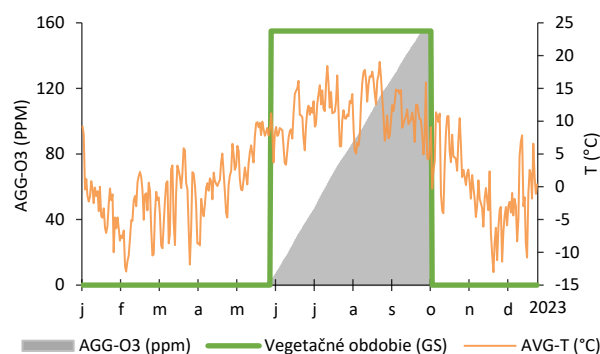
od 100 do 2 100 ppm. Pri odvodení závislosti medzi AGG-O₃ a OxS bola uvažovaná aj O₃ expozícia vzoriek v prírodnom prostredí počas vegetačného obdobia 2023. Zo zisteného vzťahu je možné určiť hraničné hodnoty AGG-O₃, AVG-O₃ a MO₃D, ktoré prislúchajú $0 \geq OxS \geq -0,05$ s minimálnym škodlivým účinkom O₃. Koncentrácia O₃ pre odvodenie vzťahu medzi AGG-O₃ a OxS bola kontrolovaná automatickým analyzátorom Thermo Electron Environmental 49C, EL vodivosť bola meraná kalibrovaným konduktometrom TDS Testr 11, zariadením Eutech Instrument, Singapur, súčasť Thermo Fisher Scientific Inc., ktorý je vhodný na meranie veľmi malých množstiev vzorky.

3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Pôsobenie O₃ na vegetáciu má sezónny charakter. Intenzívny účinok O₃ sa prejavuje predovšetkým vo vegetačnom období s priaznivými bioklimatickými podmienkami pre fyziologické procesy rastlín. Dĺžka vegetačného obdobia je v horskom prostredí v porovnaní s teplejšími nížinnými oblasťami kratšia a skraca sa s rastúcou nadmorskou výškou. Vhodné bioklimatické podmienky pre rast vysokohorskej vegetácie nastupujú po úplnom roztopení snehovej pokrývky, zvyčajne v druhej polovici mája a trvajú do začiatku nástupu chladnejšieho obdobia v októbri, kedy normálové priemerné teploty vzduchu klesajú pod úroveň 5 °C (Lukasová et al., 2023). V roku 2023 obdobie bez snehovej pokrývky s priemernými dennými teplotami vzduchu v rozsahu od 5 do 20 °C trvalo od začiatku júna do konca septembra (Obr. 2). Pre dané obdobie, t. j. od 1. júna do 30. septembra, boli na základe prístrojového merania priemerných hodinových koncentrácií O₃ na ObSP odvodené hodnoty agregovanej AGG-O₃ (154,4 ppm) a priemernej koncentrácie AVG-O₃ (52,7 ppb ± 7,1) (Tab. 1), ktoré možno považovať za reprezentatívne pre alpínske ekotónové pásmo s dominantným rozšírením borovice horskej.

Obrázok 2. Agregovaná hodnota koncentrácie O₃ (AGG-O₃, ppm) počas vegetačného obdobia 2023 odvodená z meraní priemerných hodinových koncentrácií O₃ pomocou aktívneho O₃ analyzátoru na ObSP; vegetačné obdobie (zelená čiara > 0) predstavuje obdobie bez výskytu snehovej pokrývky s priemernou dennou teplotou vzduchu AVG-T od 5 do 20 °C.

Figure 2. Aggregated hourly O₃ concentration (AGG-O₃, ppm) recorded by active O₃ analyser at ObSP during the growing season (GS) 2023; GS covered warm months from June to September without the occurrence of snow cover (green line > 0) and mean daily air temperature AVG-T in the range from 5 to 20 °C.

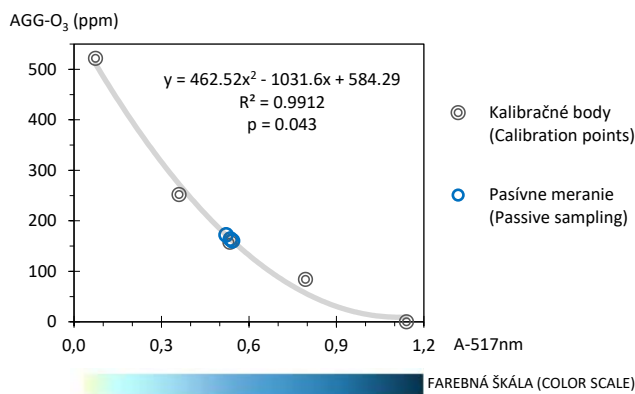


Obrázok 3.

Polynomický regresný vzťah medzi agregovanou koncentraciou O₃ (AGG-O₃, ppm) a absorbanciou A-517nm odvodený na základe kalibračného merania v laboratórnych podmienkach (kalibračné body) a hodnoty A-517nm pre IF exponované vo vonkajšom prostredí na ObSP počas vegetačného obdobia 2023 (modré krúžky).

Figure 3.

Polynomial regression between aggregated O₃ concentration (AGG-O₃, ppm) and A-517nm of IF based on calibration measurement in laboratory conditions (calibration points) and A-517nm for IF exposed in the field conditions at ObSP during GS 2023 (blue circles).



Monitoring O₃ realizovaný pomocou aktívneho merania na ObSP bol doplnený pasívnymi snímačmi na báze IF. Testovanie citlivosti IF na AGG-O₃ v laboratórnych podmienkach potvrdilo predpokladanú chemickú odozvu indiga na O₃, ktorá je identifikovateľná aj vo farebnej škále od tmavomodrej (bez expozície O₃) až po bledožltú (extrémne vysoká expozícia O₃). Kalibračná krivka (Obr. 3) definovaná polynomickou rovnicou $y = 462,52x^2 - 1031,6x + 584,29$ ukazuje silnú korelačnú závislosť ($R^2 = 0,9912$, p -hodnota $< 0,05$) medzi sledovanými veličinami: $y = \text{AGG-O}_3$ (ppm), $x = \text{A-517nm}$. Hodnoty absorbancie A-517nm pre IF exponované počas vegetačného obdobia 2023 na ObSP sa pohybovali na úrovni $0,534 \pm 0,011$ (Obr. 3). Po prepočte podľa kalibračnej rovnice sme získali sezónne koncentrácie AGG-O₃ (P) = 165 ppm, resp. AVG-O₃ (P) = 56,3 ppb. Sú to podstatne vyššie hodnoty ako priemerné sezónne koncentrácie O₃ monitorované pasívnymi snímačmi na báze indiga v období 2015–2020 v lesnom prostredí Kremnických vrchov (20 až 30 ppb; Janík et al., 2023). Uvedené výsledky sú však v súlade s údajmi z monitorovacej siete O₃ na Slovensku, ktoré potvrdzujú nárast priemerných ročných koncentrácií O₃ s nadmorskou výškou (Štefánik a Šedivá, 2022; SHMÚ, 2023). Odchýlky medzi pasívnym a aktívnym meraním na ObSP pre AGG-O₃, resp. AVG-O₃, boli podstatne nižšie (+7 %, Tab. 1) v porovnaní s inými metódami pasívneho monitoringu, kde sa rozdiely pohybovali v rozsahu -14 % až 77 % (Pitar et al., 2018).

Výsledky testovania biologickej odozvy borovice horskej na O₃ pomocou modifikovanej EL metódy potvrdili nárast poškodenia INX-O₃ so zvyšujúcou sa expozíciou AGG-O₃ (Obr. 4 vľavo). $\text{INX}_0 = 11,32\%$ odvodený z regresného

vzťahu $y(\text{INX}_0) = 11,3153\exp(0,0007x)$ pre $x(\text{AGG-O}_3) = 0$ bol použitý na výpočet OxS a odvodenie závislosti medzi OxS a AGG-O₃ (Obr. 4 vpravo). Z uvedeného vzťahu vyplýva, že mierne narušenie oxidačnej stability $0 \geq \text{OxS} \geq 0,05$ sa môže prejavovať pri pomerne vysokých hodnotách $171,1 \text{ ppm} \leq \text{AGG-O}_3 \leq 478,9 \text{ ppm}$ (Tab. 1). Výrazný pokles OxS $< -0,40$ sme zaznamenali pri AGG-O₃ $> 2100 \text{ ppm}$ (Obr. 4 vpravo). Agregované hodnoty AGG-O₃ od 500 do 2100 ppm prepočítané na priemerné sezónne hodinové AVG-O₃ v rozsahu od 171 do 717 ppb predstavujú približne 3 až 13 násobok dlhodobého priemeru 51,6 ppb (Lukasová et al., 2022). Výskyt takýchto extrémne vysokých koncentrácií O₃ v prízemnej vrstve atmosféry je vysoko nepravdepodobný, preto riziko poškodenia borovice horskej oxidačným stresom z O₃ sa javí ako nízke.

Porovnanie výstupov DO₃SE modelu pre AOT40, Fst a MO₃D s použitím vstupných údajov z aktívneho (A) a pasívneho (P) monitoringu O₃ znázorňuje Obr. 5. Priebeh Fst poukazuje na mierne vyššie hodnoty Fst (P) ako Fst (A) v druhej polovici vegetačného obdobia, čo spôsobilo, že MO₃D (P) = 11,6 mmol m⁻² na konci vegetačného obdobia prevýšila MO₃D (A) = 10,9 mmol m⁻² asi o 6,4 % (Tab. 1). Korelačné koeficienty (Tab. 2) zdôrazňujú tesnejšiu závislosť medzi Fst a meteorologickými faktormi (AT, VPD, PAR) ako medzi Fst a koncentraciou O₃ (korunová výška 2 m). Hodnotu MO₃D tak viac ovplyvňujú meteorologické podmienky ako samotný O₃. Pri modelovaní MO₃D je preto možné uvažovať aj s použitím AVG-O₃ z pasívnych IF. Naopak, podstatne vyšší rozdiel (+42,4 %) v prípade AOT40 (Tab. 1) naznačuje, že výpočet tejto metriky s použitím AVG-O₃ (P) má orientačný charakter.

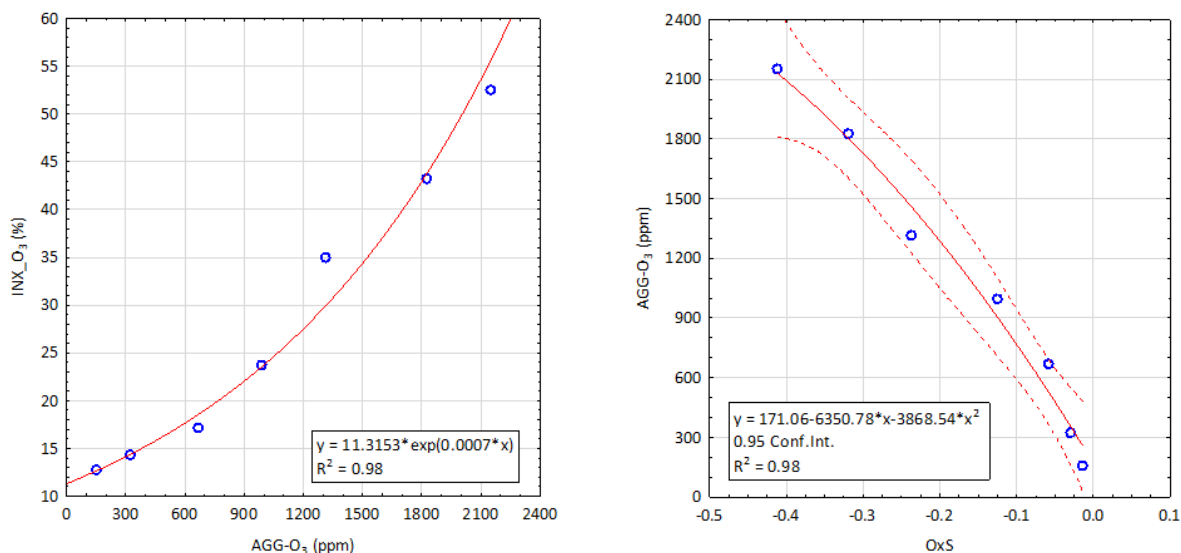
Tabuľka 1. Koncentrácie O₃ (agregovaná AGG-O₃ a priemerná AVG-O₃) a odvodené O₃ metriky (MO₃D a AOT40) na hodnotenie účinku O₃ na borovicu horskú pre dva odlišné spôsoby monitorovania O₃ (aktívny – A, pasívny – P) na ObSP počas vegetačného obdobia 2023; projekcia predstavuje odhad jednotlivých ukazovateľov v prípade OxS = 0 (limitná úroveň) a OxS = -0,05 (pokles oxidačnej stability o 5 %).

Table 1. Comparison of O₃ concentrations (aggregated AGG-O₃, average AVG-O₃) and derived O₃ metrics (MO₃D, AOT40) to assess the effect of O₃ on dwarf mountain pine for two different O₃ monitoring methods (active A, passive P) at ObSP during of GS 2023; projection represents estimation of presented characteristic for OxS = 0 (limit value) and OxS = -0.05 (decrease of oxidation stability by 5%).

	OxS	AGG-O ₃ (ppm)			AVG-O ₃ (ppb)			MO ₃ D (mmol m ⁻²)			AOT40 (ppm h)		
		(A)	(P)	Δ	(A)	(P)	Δ	(A)	(P)	Δ	(A)	(P)	Δ
Vegetačné obdobie (GS) 2023	OxS > 0	154,4	165	6,9%	52,7 ± 7,1	56,3	6,8%	10,9	11,6	6,4%	6,6	9,4	42,4%
Projekcia (Projection)	OxS = 0	171,1	:	:	58,4	:	:	≈ 11,9	:	:	:	:	:
	OxS = -0,05	478,9	:	:	163,6	:	:	≈ 33,3	:	:	:	:	:

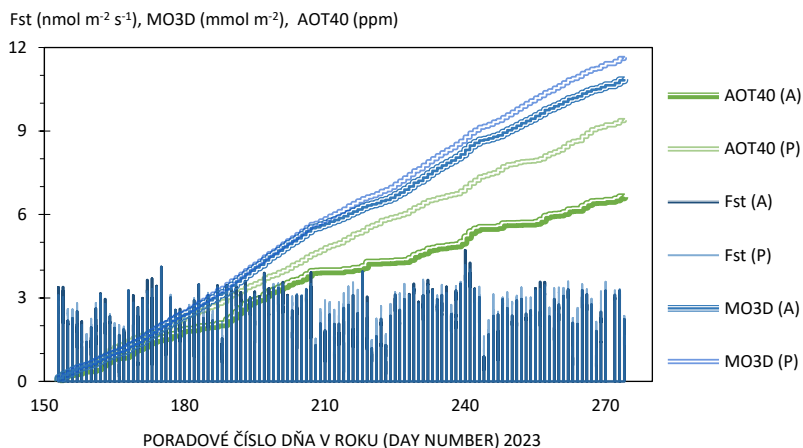
Obrázok 4. Regresné vzťahy medzi agregovanou koncentráciou O_3 (AGG- O_3 , ppm) a indexom poškodenia INX- O_3 (vľavo) a oxidačnou stabilitou (OxS) (vpravo) odvodené na základe simulácie oxidačného stresu na vzorke ihličia borovice horskej na konci vegetačného obdobia 2023; oxidačný stres bol simulovaný v laboratórnych podmienkach s použitím umelo generovaného O_3 pri kontrolovanej koncentrácii O_3 s rôznou dobou expozície (1h, 3h, 5h, 7h, 10h, 12 h).

Figure 4. Relationships between aggregated O_3 concentration (AGG- O_3 , ppm) and injury index INX- O_3 (left) and oxidative stability (OxS) (right) based on the simulation of oxidative stress on dwarf mountain pine needle samples collected at the end of GS 2023; oxidative stress was simulated in laboratory conditions using artificially generated O_3 at a controlled O_3 concentration with different exposure times (1h, 3h, 5h, 7h, 10h, 12 h).



Obrázok 5. Výsledky modelu DO_3SE pre stomatálny tok O_3 (Fst) a O_3 metriky (AOT40, MO_3D) pre borovicu horskú odvodené na základe vstupných údajov z aktívneho (A) a pasívneho (P) spôsobu monitorovania koncentrácie O_3 na ObSP počas vegetačného obdobia 2023.

Figure 5. Results of DO_3SE model for stomatal O_3 flux (Fst) and O_3 metrics (AOT40, MO_3D) and derived for dwarf mountain pine considering two different O_3 monitoring methods: active (A) and passive (P) used at the study site ObSP during GS 2023.



Hodnota AOT40(A) = 6,6 ppm h (Tab. 1) znamená prekročenie kritickej úrovne AOT40 pre lesnú vegetáciu (5 ppm h) a naznačuje škodlivý účinok O_3 na borovicu horskú vo vyšších polohách Vysokých Tatier. Táto kritická úroveň bola v priemere za obdobie 2018–2022 prekročená aj na ďalších horských lokalitách, ktoré sú začlenené do monitorovacej siete kvality ovzdušia SHMÚ. Priemerné hodnoty pre Kojšovskú hoľu (6,8 ppm h) a Chopok (12,3 ppm h) však reprezentujú AOT40 na ochranu vege-

tácie s kratšou dĺžkou vegetačného obdobia (máj – júl) a sú posudzované podľa cieľovej hodnoty AOT40 pre ochranu vegetácie (18 000 $\mu\text{g m}^{-3}$ alebo 9 ppm h). Podľa tohto kritéria, škodlivý účinok O_3 by sa mal prejavíť iba na vegetácii v oblasti Chopku. Ak by sme pre ObSP uvažovali vstupnú koncentráciu O_3 v normalizovanej výške 20 m a skrátené 3 mesačné obdobie (jún – august), potom hodnota AOT40 (A) = 12,0 ppm h by bola na úrovni porovnateľnej s lokalitou Chopok.

Veľká časť európskych lesov je vystavená O_3 koncentráciám, ktoré vedú k prekročeniu cieľovej hodnoty AOT40 (Horálek et al., 2020). Hoci AOT40 je legislatívne záväzným ukazovateľom pre hodnotenie vplyvu O_3 na vegetáciu, v posledných rokoch je preferovaná metrika PODY (Emberson et al., 2000; Karlsson et al.,

2007; Ducker et al., 2018). Hodnotenie fytotoxického účinku ozónovej dávky prijatej rastlinou v jej prirodzenom prostredí však vyžaduje ďalší výskum zameraný na sledovanie biologickej odozvy rastliny na O_3 . Ozónová dávka prijatá rastlinou cez otvorené prieduchy môže vytvárať reaktívne formy kyslíka (ROS) a nežiadúcou oxidáciou narušiť tok elektrolytu v bunke. Metóda úniku elektrolytu je metodika používaná na testovanie integrity bunkovej membrány rastlín v stresových podmienkach

(Levitt, 1972; Lee and Zhu, 2010). Výsledky modifikovanej EL metódy (Bičárová et al., 2023) ukázali pomerne dobrú odolnosť borovice horskej na O₃ dávky prijaté v prirodzenom prostredí ako aj pri umelej ozonizácii. Podľa modelového výpočtu, borovica horská vo vonkajších podmienkach pri koncentráciách AGG-O₃ (A) = 154,4 ppm, resp. AVG-O₃ (A) = 52,7 ± 7,1 ppb prijala počas vegetačného obdobia 2023 dávku MO₃D (A) = 10,9 mmol m⁻² (Tab. 1). Táto hodnota neprevýšila spodnú úroveň MO₃D ≤ 11,9 mmol m⁻² projektovanú pre O_xS = 0 (Tab. 1). Testovanie vzoriek v laboratórnych podmienkach naznačuje výraznejšie poškodenie sprevádzané poklesom O_xS pri podstatne vyšších hodnotách AGG-O₃ (Obr. 4). Je možné predpokladať, že škodlivý účinok O₃ v dôsledku narušenia oxidačnej stability sa začne prejavovať pri hodnotách MO₃D ≥ 33,3 mmol m⁻². Podobné hodnoty kritickej úrovne ozónovej dávky (19 a 32 mmol m⁻²) boli odvodené na základe vzťahu medzi POD₀ a poškodením pozorovaným na povrchu ihličiek pre ihličnany s vysokou (borovica limbová, *Pinus cembra*) a strednou citlivosťou na O₃ (borovica lesná, *Pinus sylvestris*), (Sicard et al., 2016). V juhozápadnej Európe sú lesné spoločenstvá vystavené vysokým koncentráciám O₃ a spolu s ďalšími negatívnymi faktormi (deficit zrážok, pôdne sucho) predstavujú závažné riziko zhoršenia ich zdravotného stavu.

Tabuľka 2. Štatisticky významné korelácie ($p < 0,05$) vyjadrené Pearsonovým korelačným koeficientom (r) medzi modelovaným stomatálnym tokom O₃ – Fst a vstupnými údajmi: koncentrácia O₃ z aktívneho merania prepočítaná na korunnú výšku – O₃ (A), teplota vzduchu – AT, sýtosťný doplnok – VPD, fotosynteticky aktívne žiarenie – PAR a potenciál pôdnej vody – SWP), ktoré sú relevantné pre výpočet MO₃D.

Table 2. Statistically significant correlations ($p < 0.05$) expressed by Pearson's coefficient (r) between modelled stomatal O₃ flux – Fst and model input variables: O₃ concentration from active monitoring recalculated at canopy height – O₃ (A), air temperature – AT, vapour pressure deficit – VPD, photosynthetically active radiation – PAR and soil water potential – SWP, relevant for the calculation of MO₃D.

Modelové premenné (Model variables)	O ₃ (A) (ppb)	AT (°C)	VPD (kPa)	PAR (μmol m ⁻² s ⁻¹)	SWP (MPa)
Fst (nmol m ⁻² s ⁻¹)	0,34	0,61	0,55	0,78	-0,14

4 ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo overiť možnosť použitia pasívnej indigovej metódy pre výpočet O₃ metrík (MO₃D, AOT40) a pomocou bioindikátora O_xS preskúmať citlivosť borovice horskej na expozíciu O₃ vo vysokohorskom prostredí. Výsledky poukazujú na porovnateľné výsledky AGG-O₃ (ppm) a AVG-O₃ (ppb) pre aktívny i pasívny spôsob merania. Výraznejšie rozdiely sa prejavili pri modelovom výpočte O₃ metrík. Nahradenie automatických meraní O₃ priemernou sezónnou AVG-O₃ (P) spôsobilo zvýšenie MO₃D o 6,4 % a ATO40 o 42,4 %. Uvedené rozdiely môžu byť ovplyvnené charakterom denného chodu O₃. Zhladený denný priebeh v prípade AVG-O₃ (P) nezohľadňuje variabilitu 1-h koncen-

trácií O₃ počas dňa a do O₃ metrík vnáša určité neistoty, ktoré sa prejavili najmä pri výpočte AOT40, kde má koncentrácia O₃ kľúčový význam. Koncentrácia O₃ je dôležitá aj pri výpočte MO₃D, avšak ako naznačuje korelačná analýza, vplyv meteorologických faktorov je výraznejší. AVG-O₃ (P) preto môže byť prijateľnou alternatívou pre MO₃D, pričom výpočet AOT40 má len orientačný charakter. Hodnotenie škodlivého účinku O₃ na borovicu horskú v oblasti ObSP na základe AOT40 (A) = 6,6 ppm h indikuje prekročenie kritickej úrovne pre ochranu lesných drevín (5 ppm h) v priebehu vegetačného obdobia 2023. Testovanie citlivosti asimilačných orgánov borovice horskej v laboratórnom prostredí však ukázalo, že tento druh vysokohorskej dreveniny veľmi dobre odoláva oxidačnému stresu. Zistili sme, že MO₃D prijatá borovicou horskou počas vegetačného obdobia 2023 bola v obidvoch prípadoch, t. j. z aktívneho (10,9 mmol m⁻²) i pasívneho (11,6 mmol m⁻²) monitoringu O₃ nižšia ako hodnota MO₃D (11,9 mmol m⁻²) projektovaná pre O_xS = 0. Výraznejší škodlivý účinok O_xS < -0,05 by sa mohol prejavovať po prekročení hodnoty MO₃D = 33,3 mmol m⁻².

PodĎakovanie

Táto práca vznikla s podporou Vedeckej grantovej agentúry Slovenskej republiky, projekt VEGA 2/0093/21. Autori ďakujú Slovenskému hydrometeorologickému ústavu za spoluprácu pri zabezpečení meraní na observatóriu Skalnaté Pleso, Ústavu hydrologie SAV za zapožičanie prístrojového vybavenia a Ing. J. Adamčákovi za technickú pomoc pri konštrukcii pasívneho snímača použitého v tejto práci.

5 LITERATÚRA

- Bičárová, S.–Lukasová, V.–Adamčíková, K.–Žatková, L.–Milovský, R.–Shashikumar, A.–Pažitný, J.–Buchholcerová, A.–Bilčík, D., 2023, Modified electrolyte leakage method for testing the oxidative stability of *Pinus mugo* Turra under ozone-induced stress. *Folia Oecologica*, 50/1, 1–15. <https://doi.org/10.2478/foecol-2023-0001>.
- Bičárová, S.–Sitková, Z.–Pavlenková, H.–Fleischer, P. Jr.–Fleischer, P. Sr.–Bytnerowicz, A., 2019, The role of environmental factors in ozone uptake of *Pinus mugo* Turra. *Atmospheric Pollution Research*, 10, 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.08.003>.
- Bičárová, S.–Sojáčková, M.–Burda, C.–Fleischer, P., 2005, Summer ground level ozone maximum in Slovakia in 2003. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 35, 265–279.
- CLRTAP, 2017, Mapping Critical Levels for Vegetation, Chapter III of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long range Transboundary Air Pollution, www.icpmapping.org.
- Ducker, J.A.–Holmes, C.D.–Keenan, T.F.–Fares, S.–Goldstein, A.H.–Mammarella, I.–Munger, J.W.–Schnell, J., 2018, Synthetic ozone deposition and stomatal uptake at flux tower sites. *Biogeosciences*, 15, 5395–5413. <https://doi.org/10.5194/bg-15-5395-2018>.
- Emberson, L.D.–Ashmore, M.R.–Cambridge, H.M.–Simpson, D.–Tuovinen, J.P., 2000, Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environ. Pollut.*, 109, 403–413. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00043-9).

- EU, 2008, EU directive 2008/50/EC of the European parliament and of the council on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>.
- Flint, H.L.–Boyce, B.R.–Beattie, D.J., 1967, Index of injury—a useful expression of freezing injury to plant tissues as determined by the electrolytic method. *Canadian Journal of Plant Sciences*, 47, 229–230, <https://doi.org/10.4141/cjps67-043>.
- Fuhrer, J.–Skärby, L.–Ashmore, M.R., 1997, Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution*, 97/1–2, 91–106, [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00067-5).
- Horálek, J.–Schreiberová, M.–Vlasáková, L.–Marková, J.–Kurfürst, P.–Schováňková, J.–Schneider, P.–Tognet, F.–González Ortiz, A.–Guerreiro, C., 2020, European air quality maps for 2018. Eionet Report ETC/ATNI 2020/10 <https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/srv/eng/catalog.sear.ch#metadata/282ed4e9-d58a-44ae-8c48-e688bdfed281>.
- Janík, R.–Kubov, M.–Schieber, B., 2023, The ground-level ozone concentration in forest and urban environments in central Slovakia. *Environ Monit Assess* 195, 24, <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10605-8>.
- Jarvis, P. G., 1976, The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philos. T. Roy. Soc. Lond. B*, 87, 593–610, <https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0035>.
- Karlsson, P.E.–Braun, S.–Broadmeadow, M.–Elvira, S.–Emberson, L.–Gimeno, B.S.–Le Thiec, D.–Novak, K.–Oksanen, E.–Schaub, M.–Uddling, J.–Wilkinson, M., 2007, Risk assessments for forest trees: The performance of the ozone flux versus the AOT concepts, *Environ. Pollut.*, 146, 608–616, <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.012>.
- Krupa, S.–Nosal, M.–Peterson, D.L., 2001, Use of passive ambient ozone (O₃) samplers in vegetation effects assessment, *Environmental Pollution*, 112/3, 303–309, [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00228-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00228-1).
- Lee, B.–Zhu, J.K., 2010, Phenotypic analysis of Arabidopsis mutants: electrolyte leakage after freezing stress. *Cold Spring Harbor Protocols*(pdb.prot4970), <https://doi.org/10.1101/pdb.prot4970>.
- Levitt, J., 1972, *Responses of plants to environmental stresses*. New York: Academic Press, xiv, 698 pp.
- Lukasová, V.–Bičárová, S.–Buchholcerová, A.–Adamčíková, K., 2022, Low sensitivity of *Pinus mugo* to surface ozone pollution in the subalpine zone of continental Europe. *Int J Biometeorol* 66, 2311–2324, <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02359-2>.
- Lukasová, V.–Varšová, S.–Buchholcerová, A.–Onderka, M.–Bilčík, D., 2023, Changes in the high-altitude climate of High Tatra Mts. evaluated by climatic normals from the Skalnaté Pleso Observatory. *In Meteorological Journal*, 26/1, 47–52.
- Maruo, Y.Y.–Kunioka, T.–Akaoka, K.–Nakamura, J., 2009, Development and evaluation of ozone detection paper, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 135/2, 575–580, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.09.016>.
- Mills, G.–Pleijel, H.–Braun, S.–Bueker, P.–Bermejo, V.–Calvo, E.–Danielsson, H.–Emberson, L.–Gonzalez Fernandez, I.–Gruenhage, L.–Harmens, H.–Hayes, F.–Karlsson, P.E.–Simpson, D. (2011). New stomatal flux-based critical levels for ozone effects on vegetation. *Atmospheric Environment*, 45(28), 5064–5068, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.009>.
- Paoletti, E.–Materassi, A.–Fasano, G.–Hoshika, Y.–Carriero, G.–Silaghi, D.–Badea, O., 2016, A new-generation 3D ozone FACE (Free Air Controlled Exposure). *Science of The Total Environment*, 575: 1407–1414, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.217>
- Pitar, D.–Popa, I.–Leca, S.–Badea, O., 2018, Passive vs. active: Applicability of Loibl function in modelling hourly ozone concentrations from passive samplers in Romanian Intensive Monitoring Network. *In International conference on ozone and plant ecosystem*, 21–25 May, 2018. Florence : ICP Vegetation, p. 32.
- SEI, 2023, DO₃SE (Deposition of ozone for stomatal exchange). <https://www.sei-international.org/do3se>.
- SHMÚ, 2023, Správa o kvalite ovzdušia v roku 2022. https://www.shmu.sk/File/oko/rocniky/2022_Sprava_o_KO_v_SR_v1.pdf.
- Sicard, P.–De Marco, A.–Dalstein-Richier, L.–Tagliaferro, F.–Renou, C.–Paoletti, E., 2016, An epidemiological assessment of stomatal ozone flux-based critical levels for visible ozone injury in Southern European forests, *Sci. Total Environ.*, 541, 729–741, <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.113>.
- Štefánik, D.–Šedivá, T., 2022, Denný chod koncentrácií NO₂, NO a O₃ na stanicach národnej monitorovacej siete kvality ovzdušia v rokoch 2010–2020, https://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/MET_CASOPIS/1658950036_MC_2022-1.pdf.
- Yuska, D.E.–Skelly, J.M.–Ferdinand, J.A.–Stevenson, R.E.–Savage, J.E.–Mulik, J.D.–Hines, A., 2003, Use of bio-indicators and passive sampling devices to evaluate ambient ozone concentrations in north central Pennsylvania, *Environmental Pollution*, 125/1, 71–80, [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00096](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00096).

RIZIKOVÉ LESNÉ OBLASTI PRE VÝSKYT INTENZÍVNYCH ZRÁŽOK NA SLOVENSKU

VERONIKA LUKASOVÁ¹, PETR ŠTĚPÁNEK², SVETLANA VARŠOVÁ¹, ANNA BUCHHOLCEROVÁ¹,
DUŠAN BILČÍK¹, PAVOL NEJEDLÍK¹

¹ Ústav vied o Zemi SAV, v.v.i., Dúbravská cesta 9, Bratislava, 84005, Slovenská republika

² Ústav výzkumu globální změny, AV ČR, v.v.i., Bělidla 4a, Brno, 60300, Česká republika

Our study is aimed to identify forested areas in Slovakia with the occurrence of the most intense rainfall and to summarize measures from available sources that can increase the retention capacity of stands in these areas. Intense rainfalls were modelled using data from precipitation stations of the Slovak Hydrometeorological Institute from the period 1995–2021. The relationship between intensity and duration of rainfall was defined using IDF curves (Intensity Duration Frequency curves), based on the probability distribution of rainfall intensities measured in the past. We used the GEV (Generalized Extreme Value distribution) probability distribution and estimated the parameters using Bayesian inference. Estimates of quantiles of rainfall intensities were determined for rain durations from 5 to 1440 minutes and return periods from 2 to 1000 years. Our results showed that forest areas at risk differed depending on the duration of intense rain and the returned period. Maximum 15 and 60-minute rainfall with a return period of 30 years, reaching up to 33 mm and 50 mm, respectively, are located in the mountains of Slovenské rudohorie (Slovak Ore Mountains). The least affected regions by these short-term rains are the area of Podunajská nížina (Danube Lowland), Stredné Beskydy (Central Beskids), Veľká Fatra (Great Fatra), Oravská kotlina (Orava Basin), Skorušinské vrchy (Skorušinské Hills), Zuberská brázda (Zuberská Trough), and the western part of the Tatra region, where maximum intensity reaches 24–26 mm for 15-minute and 41–43 mm for 60-minute precipitation. When evaluating 8 and 24-hour precipitation with a return period of 30 years, the highest totals of 76–78 mm and 94–97 mm were determined for areas in the most eastern part of Slovakia, mainly in the region of Východoslovenská nížina (Eastern Slovak Lowland), Vihorlatské vrchy (Vihorlat Hills), Bukovské vrchy (Bukovské Hills), and the eastern part of Nízke beskydy (Low Beskids). The lowest maxima for 8 and 24-hour precipitation were found in the western part of Biele Karpaty (White Carpathians), Myjavská pahorkatina (Myjava Hills), and the northern part of Záhorská nížina (Záhorie Lowland). Forest areas at the highest risk for the occurrence of intense rainfall require increased attention and adequate care to prevent flash floods. Emphasis should be placed mainly on: 1. cultivating stands with high interception and transpiration, good health, and structure increasing the retention capacity of stands; 2. choosing the right cultivation practices leading to increased retention capacity of stands and stand soil; 3. the restoration and construction of flood control measures in risk catchments.

Cieľom našej práce bolo identifikovať lesné oblasti na Slovensku s výskytom najintenzívnejších zrážok a z dostupných zdrojov zosumarizovať opatrenia, ktoré pomôžu zvýšiť retenčnú kapacitu porastov v týchto oblastiach. Intenzívne zrážky sme modelovali použitím údajov zo zrážkomerných staníc Slovenského hydrometeorologického ústavu z obdobia 1995–2021. Vzťah medzi intenzitou a trvaním zrážok sme definovali pomocou IDF kriviek (Intensity Duration Frequency curves), vychádzajúc z pravdepodobnosti rozdelenia intenzít zrážok nameraných v minulosti. Použili sme GEV (Generalized Extreme Value distribution) rozdelenia pravdepodobnosti a parametre sme odhadli pomocou bayesovskej inferencie. Odhady kvantilov intenzít zrážok boli stanovené pre trvanie dažďa od 5 do 1440 minút a doby opakovaní od 2 do 1000 rokov. Naše výsledky ukázali, že rizikové lesné oblasti sa líšili v závislosti od dĺžky trvania intenzívneho dažďa a doby opakovania. Maximálne 15 a 60-minútové zrážky, ktoré dosiahnu až 33 mm, resp. 50 mm s dobou opakovania 30 rokov, sa nachádzajú v pohoriach Slovenského rudohoria. Najmenej zasiahnutým regiónom týmito krátkodobými zrážkami je oblasť Podunajskej nížiny, Stredné Beskydy, Veľká Fatra, Oravská kotlina, Skorušinské vrchy a Zuberská brázda, a západná časť Tatranskej oblasti, kde tieto dosahujú maximálne 24–26 mm pri 15-minútových resp. 41–43 mm pri 60-minútových zrážkach. Pri hodnotení 8-hodinových a 24-hodinových zrážok s dobou opakovania 30 rokov boli najvyššie úhrny 76–78 mm, resp. 94–97 mm určené pre oblasti na krajnom východe Slovenska, hlavne oblasť Východoslovenskej nížiny, Vihorlatské vrchy, Bukovské vrchy a východnú časť Nízkych Beskýd. Najnižšie maximá 8-hodinovej a 24-hodinovej zrážky boli zistené v západne časti Bielych Karpát, Myjavskej pahorkatine a na severe Záhorskej nížiny. Aby sa predišlo bleskovým povodňam v najohrozenejších lesných oblastiach, lesy si vyžadujú zvýšenú pozornosť a adekvátnu starostlivosť. Dôraz by mal byť hlavne na: 1. pestovanie porastov s vysokou interceptiou a transpiráciou, dobrým zdravotným stavom a štruktúrou zvyšujúcou retenčnú schopnosť porastov; 2. voľbu správnych pestovných postupov vedúcich k zvýšeniu retenčnej schopnosti porastov a porastovej pôdy; 3. obnovu a výstavbu protipovodňových opatrení v rizikových povodiach.

Key words: maximum precipitation, IDF, Bayesian inference, forests, measures

1 ÚVOD

Lesy sa často skloňujú ako prírodná bariéra, ktorá stojí medzi zrážkami a vznikom povodne. Súvisí to so schopnosťou lesov zadržiavať zrážkovú vodu v odtoku (retenčná funkcia), hromadiť zrážkovú vodu na povrchu drevín, v pôdnej pokrývke a v samotnej pôde (akumulačná funkcia) a spoma-

ľovať odtok vody premenou povrchového odtoku na odtok podzemný (retardačná funkcia) (Mráček a Krečmer, 1975). Podľa správy FOREST EUROPE/FAO/UNECE o stave európskych lesov z roku 2020 bola Slovenská republika 13. najlesnatejšia spomedzi 43 európskych štátov a mala vyššiu lesnatosť, ako je priemer Európy (34,8 %) či EÚ-28 (38,3 %).

Za posledných 100 rokov lesnatosť postupne stúpala z 31,7 % z celkovej výmery územia zaznamenaných v roku 1923 na dnešných 41,3 % a pohybuje sa na úrovni okolo 2 miliónov ha (Zelená správa, 2021). To, do akej miery sú lesy schopné zabrániť vzniku povodne pri intenzívnych zrážkach, ovplyvňujú okrem ich percentuálneho podielu aj ďalšie faktory.

V problematike intenzívnych zrážok a vzniku povodní je dôležitým ukazovateľom bilancia vody v lesnom ekosystéme. Tá vyjadruje vzťah medzi príjmovými zložkami vody, čiže atmosférickými zrážkami a výdajovými zložkami, evapotranspiráciou a odtokom do povrchových a podzemných vôd. V prípade, že atmosférické zrážky sú jediným zdrojom vody pre lesný ekosystém, vodnú bilanciu ako zmeny zásob vody v pôde a fytomase definujeme ako rozdiel medzi zrážkami na jednej strane a evapotranspiráciou a odtokom na strane druhej. Z hľadiska posudzovania účinku lesov na transformáciu zrážok do povrchového odtoku môžeme hodnotiť vplyv lesa na celkovú vodnosť vodných tokov alebo vplyv lesa z hľadiska jeho protipovodňovej ochrany. V prvom prípade sa zohľadňuje evapotranspirácia lesných ekosystémov, ktorá vo vzťahu k celkovému úhrnu zrážok určuje, koľko vody opustí ekosystém formou povrchového resp. podzemného odtoku. Z hľadiska protipovodňovej ochrany sa hodnotí okamžitý záchyt zrážok v korunách stromov (intercepcia) a stav bylinnej etáže a vrstvy nadložného humusu, ktoré majú rozhodujúci vplyv na infiltráciu padajúcej a stekajúcej vody do pôdneho prostredia (Mindáš et al., 2001). Proces infiltrácie ovplyvňuje viacero faktorov. Z pohľadu zrážok je to ich intenzita a dĺžka trvania. Z pohľadu pôdy sú to jej hydro-fyzikálne vlastnosti, najmä zrnitosť a počiatkový vlhkosťný stav (Mindáš et al., 2001). Čím má pôda väčšiu zrnitosť, tým je infiltrácia vyššia (Bulantová, 2012). Naopak, čím je pôda vlhkejšia, tým menej je priepustná (Šály, 1988). Infiltrácia zrážkovej vody závisí aj od stavu vrstvy nadložného humusu a s prekorenением pôdneho profilu. Na prekorenenie pôdneho profilu má veľký vplyv štruktúra porastu, keď porasty so stupňovým, resp. vertikálnym zápojom majú lepšie a hlbšie prekorenenie pôdneho profilu. Porasty s horizontálnym zápojom, hlavne nepôvodné smrekové, majú nepriaznivé prekorenenie a hospodárenie s vodou. Pri takejto štruktúre lesa z hľadiska udržania zrážok pri nepriaznivom pôdnom type (flyš) je retenčná schopnosť lesa veľmi nízka (Saniga, 2022).

Tým, že majú lesy väčšiu spotrebu vody ako iné typy vegetácie, majú aj veľký vplyv na vodnú bilanciu v povodiach (Andreassian, 2004). Celková retenčná - vodozadržná kapacita lesných porastov pri krátkodobých intenzívnych zrážkach môže dosahovať až 70 mm. Táto hodnota platí pre stav 100%-nej lesnatosti v krajine a pre zakmenenie 1,0 (resp. zápoj 100 %). Súčasťou lesných komplexov sú však aj odlesnené či bezlesné plochy. Pokles retenčnej kapacity krajiny s klesajúcim percentom lesnatosti klesá (Mindáš et al., 2001). Bosh a Hewlett (1982) na základe niekoľkoročných pozorovaní uvádzajú, že odlesňovanie, resp. zalesňovanie, ovplyvňuje odtok, pričom reakcia povodia na vegetačné zmeny je predpovedateľná a maximálny prejav zmeny v odtoku sa objaví už po niekoľkých rokoch, v priemere už po 2 až 3 rokoch (Kostka a Holko, 2006). Toto sa však týka iba mikropovodí s rozlohou do 50 km².

Bolo preukázané, že význam lesných porastov pri regulácii hydrologických prietokov bol preceňovaný, pretože dopady čiastočného alebo kompletného odstránenia lesných porastov sa prejavujú len v mikropovodiach v spojení s krátkodobými zrážkami nízkej intenzity. Ako sa zväčšuje trvanie a intenzita dažďa a veľkosť povodia, znižuje sa vplyv vegetačnej pokrývky na reguláciu odtoku (Calder et al., 2007). V makropovodiach majú významnejší vplyv na vznik väčších povodní ako hospodárenie v krajine prírodné procesy v horných častiach povodia. Rozsiahle povodne sú skôr výsledkom kombinácie maximálnych prietokov veľkých riek, vysokého odtoku z kopcov prilahlých k záplavovým oblastiam, intenzívnych zrážok, vysokých hladín podzemnej vody a chýbajúcich vodozadržných opatrení (Hofer a Messerli, 2006).

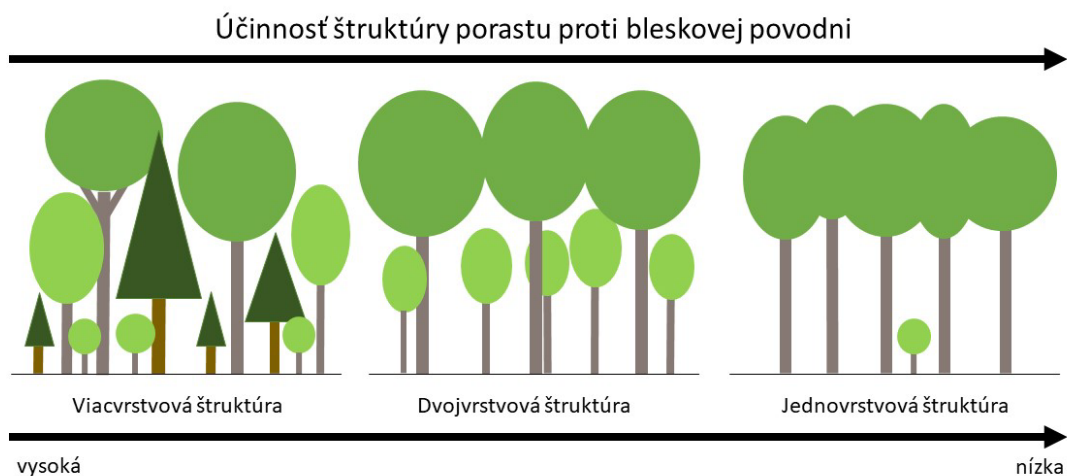
Medzi dva hlavné mechanizmy, ktorými lesná vegetácia znižuje množstvo vody odtekajúcej z ekosystému, patria intercepcia a transpirácia. Intercepcia je zachytávanie časti zrážok korunami stromov a ich následné vyparenie. Množstvo zrážok, ktoré zachytí les svojimi nadzemnými časťami, predstavuje približne 15–30 % z ročného zrážkového úhrnu. Platí, že husté ihličnaté lesy zachytia zrážok viac. Na lokalitách, kde prevládajú slabšie a častejšie dažde, to môže byť až 40 % ročného úhrnu (Friesen a Van Stan, 2019). Pre porovnanie, intercepcia trvalých trávnych porastov sa pohybuje na úrovni okolo 20 % ročných zrážok. Nižšia intercepcia je aj v odumretých porastoch (Bartík et al., 2016). V súvislosti s priebehom zrážok cez porastový korunový a kmeňový priestor sú známe dva typy korunového profilu drevín. Dáždnikový typ (smrek, jedľa), kde sa prevažná väčšina zrážok dostáva na pôdu po obvode korún stromov a lievikový typ (buk, dub), kde je dominantný stok zrážok po kmeni. Účinná porastová štruktúra, ktorá by spomalila priebeh zrážok cez korunový priestor a pracovala by proti vzniku bleskovej povodne, je taká, keď zrážky prechádzajú z jednej koruny vyššie postaveného stromu na korunu, ktorá sa nachádza pod ňou, aby znížila dynamiku zrážok, ktoré by podľa možnosti vsiakli do pôdneho profilu a neodchádzali po povrchu pôdy (Saniga, 2022). Z pohľadu transpirácie je okrem uvedeného veľmi dôležitým faktorom zdravotný stav porastov, pretože na rozdiel od intercepce, transpirácia je možná iba v živých porastoch. Predpoklad vyššej protipovodňovej ochrany majú teda predovšetkým porasty s vysokou intercepciou a transpiráciou, a to:

- viacetážové zmiešané porasty - čím viac etáží a tvarov korún, tým účinnejšia štruktúra (Obr. 1),
- porasty s vyšším podielom ihličnatých drevín - vyšší podiel ihličnanov zabezpečí vyššiu intercepciu a transpiráciu, a to aj vďaka trvalému oihliččeniu mimo vegetačného obdobia,
- porasty s vyšším zakmenením (0,8 a viac),
- porasty vitálne a zdravé (Obr. 2),
- porasty v nižších vekových triedach.

Cieľom našej práce bolo identifikovať na Slovensku lesné oblasti s rizikom výskytu najintenzívnejších zrážok a z dostupných zdrojov zosumarizovať opatrenia, ktoré pomôžu zvýšiť retenčnú kapacitu lesných porastov v týchto oblastiach.

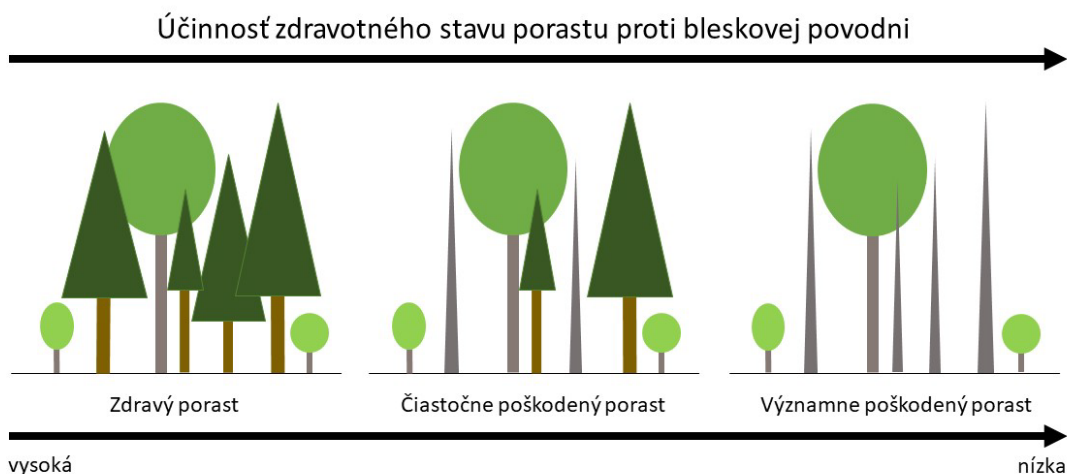
Obrázok 1. Porovnanie rôznych štruktúr lesných porastov s ohľadom na ich účinnosť proti bleskovým povodňam pri intenzívnych zrážkach.

Figure 1. Comparison of different forest stand structures' effectiveness against flash floods during intense rainfall.



Obrázok 2. Vplyv zdravotného stavu lesných porastov na ich účinnosť proti bleskovým povodňam pri intenzívnych zrážkach.

Figure 2. The influence of the health status of forests stands on their effectiveness against flash floods during intense rainfall.



Vybrané intenzity zrážok v trvaní 15 minút, 60 minút, 8 hodín a 24 hodín s dobou opakovania 30 rokov sme stanovili modelovaním s použitím minútových údajov zo zrážkomerných staníc Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ) z obdobia 1995 – 2021. História problematiky modelovania návrhových intenzít zrážok na Slovensku siaha do 50. rokov 20. storočia, kedy boli publikované prvé regionálne IDF krivky (Intensity Duration Frequency curves) pre Slovensko (Dub, 1950). Následne Šamaj a Valovič (1973) publikovali komplexnú štúdiu IDF kriviek vychádzajúc z údajov zo 68 staníc z územia Slovenska. Ďalšími významnými prácami v tejto oblasti boli napríklad štúdie Urcikán a Imriška (1986); Bara a kol. (2009); Gaál (2009) a v poslednom období publikované práce s použitím bayesovskej inferencie od Onderka a kol. (2020a); Onderka a kol. (2020b); Onderka a kol. (2022) a Onderka a Pecho (2022).

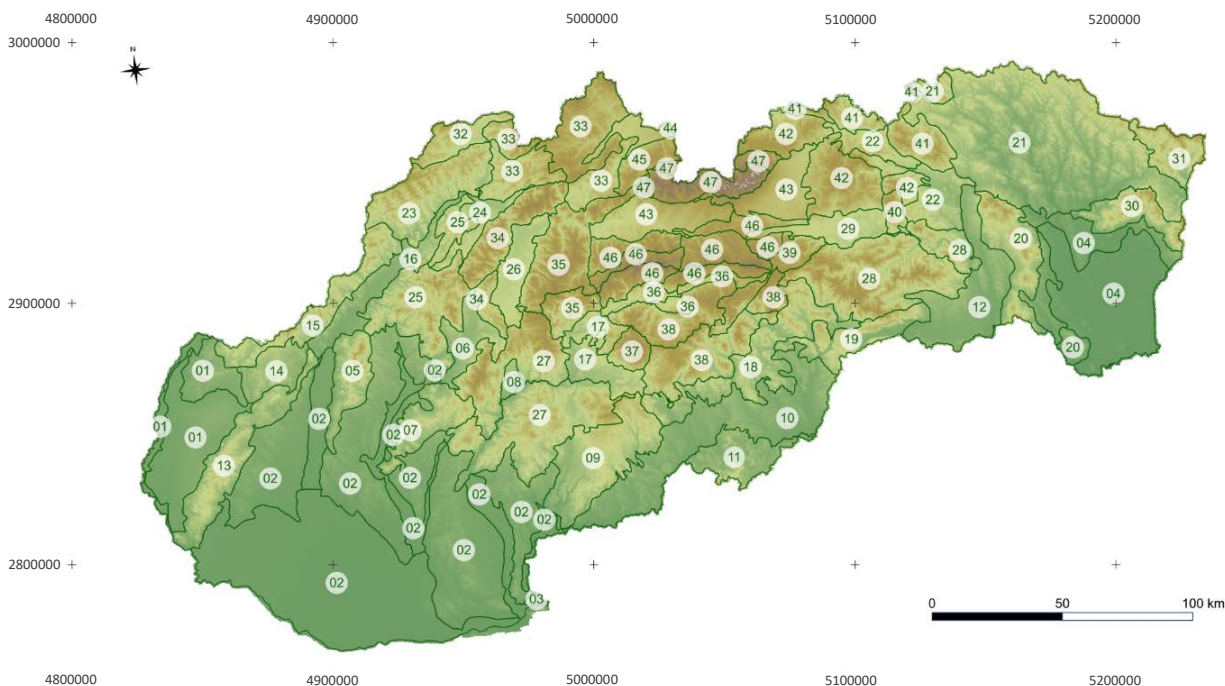
2 ÚDAJE A METÓDY

2.1 Sledované územie

Intenzívne zrážky boli v tejto štúdii modelované a interpolované na celé územie Slovenska. Vzhľadom na polohu, klíma Slovenska je prechodná medzi kontinentálnou a oceánskou. Typické je prevládajúce západné a severozápadné prúdenie, ktoré prináša vlhký vzduch od Atlantického oceánu. So stúpajúcou nadmorskou výškou všeobecne pribúda množstvo zrážok. Reliéf povrchu Slovenska je značne členitý. Lesnatosť v jednotlivých regiónoch Slovenska je veľmi rozdielna. Najnižšiu lesnatosť majú nížiny na južnom a západnom Slovensku a urbanizované územia. Najvyššiu lesnatosť majú hornaté územia, predovšetkým v Žilinskom kraji. Intenzívne zrážky v tejto práci boli priestorovo identifikované podľa lesných oblastí (Obr. 3).

Obrázok 3. Mapa lesných oblastí na Slovensku.

Figure 3. Map of forest areas in Slovakia.



Tabuľka 1. Zoznam lesných oblastí Slovenska.

Table 1. List of forest areas in Slovakia.

01	Záhorská nížina, Dyjsko-moravská niva	25	Strážovské vrchy, Súľovské vrchy
02	Podunajská nížina	26	Turčianska kotlina
03	Burda	27	Štiavnické vrchy, Javorie, Pliešovská kotlina, Pohronský Inovec, Vtáčnik, Kremnické vrchy
04	Východoslovenská nížina	28	Volovské vrchy, Čierna hora
05	Považský Inovec	29	Hornádska kotlina
06	Hornonitrianska kotlina	30	Vihorlatské vrchy
07	Tribeč	31	Bukovské vrchy
08	Žiarska kotlina	32	Západné Beskydy
09	Krupinská planina, Ostrôžky	33	Stredné Beskydy
10	Juhoslovenská kotlina, Gemerská pahorkatina	34	Malá Fatra, Žiar
11	Cerová vrchovina	35	Veľká Fatra, Starohorské vrchy, Chočské vrchy
12	Košická kotlina, Abovská pahorkatina	36	Horehronské podolie
13	Malé Karpaty	37	Poľana
14	Myjavská pahorkatina	38	Veporské vrchy, Stolické vrchy
15	Biele Karpaty	39	Spišskogemerský kras
16	Považské podolie	40	Branisko
17	Zvolenská kotlina	41	Východné Beskydy
18	Revúcka vrchovina, Rožňavská kotlina	42	Levočské vrchy, Bachureň, Spišská Magura, Ždiarska brázda
19	Slovenský kras	43	Podtatranská kotlina
20	Slanské vrchy, Zemplínske vrchy	44	Oravská kotlina
21	Nízke Beskydy	45	Skorušinské vrchy, Zuberská brázda
22	Šarišská vrchovina, Spišsko-šarišské medzihorie	46	Nízke Tatry, Kozie chrbty
23	Javorníky	47	Tatry
24	Žilinská kotlina		

2.2 Údaje

Minútové záznamy zrážkových úhrnov pre územie Slovenska, ktoré sme použili v analýzach, pochádzali zo 72 staníc za obdobie 1995–2021. Zrážkové intenzity prešli základnou kontrolou údajov. Bolo potrebné nájsť rovnováhu v nastavení kritérií kontroly tak, aby boli údaje akceptovateľné a neovplyvnili následné štatistické analýzy, ale zároveň aby neboli príliš prísne nastavené a nevyradili z analýz veľkú časť údajov. Denné sumy vypočítané z minútových úhrnov boli porovnané s dennými sumami z databázy SHMÚ,

ktoré už prešli základnou kontrolou, a ďalej prešli podrobnejšou kontrolou podľa Štěpánek et al. (2013). Merania boli v rokoch 1995–2009 robené pomocou ombrografov, od roku 2005 sú merania robené pomocou automatických váhových zrážkomerov. V periode 5 rokov (2005–2009) išlo o paralelné merania, čo umožnilo porovnať výsledky z daných dvoch prístrojov. Boli porovnané ročné maximá 15 a 30 min. dažďov vo forme mapových podkladov. Merania ombrografov sa líšili voči automatickým meraniam o $-0,493$ pre 15 min. ročné maximá, resp. $-0,399$ pre 30 min. ročné

maximá. Vyjadrením pomerov ombrografy vs. automatické zrážkomery dostaneme 1,002 pre 15 min., resp. 1,028 pre 30 min. dažde. Z tohto dôvodu boli merania považované za porovnateľné. V ďalšom kroku boli porovnávané úhrny merané s denným krokom štandardným zrážkomerom a vypočítané z minútových údajov. Hranica pre akceptáciu diferencie bola 8,4 mm. Obdobne boli porovnávané sezónne sumy zrážok merané v dennom kroku a vypočítané z minútových údajov. Stanica a daný rok boli vylúčené v prípade rozdielu 20 a viac percent. Obdobné spracovanie intenzít dažďa v ostatných rokoch (Onderka a Pecho 2022) dáva o niečo vyššie hodnoty. Toto môže byť spôsobené rozdielnou údajovou základňou. Ďalej boli kontrolované jednotlivé zrážkové epizódy na úrovni minútových úhrnov, aby boli vylúčené vysoké nárasty v minútových údajoch spôsobené nesprávnou funkciou prístroja. Po kontrole boli staničné údaje použité ako vstup do následnej analýzy extrémnych hodnôt. Vyhodnocované boli ročné maximá intenzít zrážok pre rôzne dĺžky trvania dažďa. V prípade, ak boli niektoré staničné merania krátke alebo mali výpadky merania, boli tieto skombinované s okolitými meraniami, aby bolo zabezpečené dostatočné množstvo údajov do analýz. Cieľom tohto prístupu bolo presnejšie stanovenie parametrov rozdelenia, predovšetkým jeho tvaru (napr. Overeem et al., 2008; Hanel et al., 2009).

2.3 Výpočet modelovaných intenzít zrážok

Jednou z úloh v predkladanej práci bolo stanovenie vzťahu medzi intenzitou a trvaním zrážok pomocou tzv. IDF krivky (Intensity Duration Frequency curves) pre rôzne doby opakovania, ktoré vychádzali z pravdepodobnosti rozdelenia intenzít zrážok nameraných v minulosti. Použili sme GEV (Generalized Extreme Value distribution, Coles, 2001) rozdelenia pravdepodobnosti a parametre sme odhadli pomocou bayesovskej inferencie (Gelman et al., 2003; Gesmann and Morris, 2020). Odhady kvantilov intenzít zrážok boli stanovené pre trvanie dažďa od 5 do 1440 minút a doby opakovaní od 2 do 1000 rokov. Pre účely tejto práce boli použité zrážky v trvaní 15 minút, 60 minút, 8 hodín a 24 hodín s dobou opakovania 30 rokov. Odhad parametrov GEV rozdelenia intenzít krátkodobých zrážok pomocou bayesovskej inferencie sme dosiahli aplikáciou bayesovského modelovania v jazyku R (R Core Team, 2014) a knižnice brms, ktorá komunikuje s prostredím Stan (Carpenter et al., 2017) pre Markov Chain Monte Carlo (MCMC) vzorkovanie. Konfigurácia MCMC vzorkovania bola použitá nasledovne: počet reťazcov - 4, počet iterácií - 20 000, počet vymazaných počiatočných iterácií (označované ako burn-in, alebo wamp-up) - 6000. Zatiaľ čo Stan využíva primárne Hamiltonin Monte Carlo (HMC) a jeho rozšírenie, No-U-Turn-Sampler (NUTS, Hoffman a Gelman, 2012) pre MCMC vzorkovanie ponúka značnú flexibilitu v ladení - nastavení a spúšťaní týchto reťazcov. Počet reťazcov, počet iterácií a počet vymazaných iterácií bol predmetom analýzy aplikovanej priamo na predmetné zrážkové intenzity. Vychádzali sme z doporučení v literatúre, ale výsledné hodnoty boli nakoniec určené na základe expertného odhadu so zohľadnením viacerých charakteristík, ako je napr. pomer HMS-NUTS (hodnota

HMC-NUTS bola zvýšená na 0,92) pre kontrolu divergentných prechodov.

Aby bolo možné stanoviť ľubovoľné trvanie dažďa a dobu opakovania, pre jednotlivé parametre GEV rozdelenia sme stanovili IDF krivky. Po zlogaritmovaní hodnôt trvania dažďa bola použitá lineárna regresia (Overeem et al., 2008), ktorá dávala lepšie výsledky oproti iným spôsobom stanovenia regresnej závislosti (ako napr. mocninová funkcia). Hodnoty koeficientov regresie pre každý z parametrov GEV rozdelenia boli interpolované do priestoru v rozlíšení 0,5 km metódou regresného krígingu (Hengl et al., 2007) pri použití prediktorov vychádzajúcich z reliéfu (napr. nadmorská výška, drsnosť povrchu, zemepisné súradnice a i.). Z vytvorených mapových podkladov je možné priestorovo určiť odhady kvantilov zrážkových intenzít pre vybrané trvanie dažďa a dobu opakovania.

3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

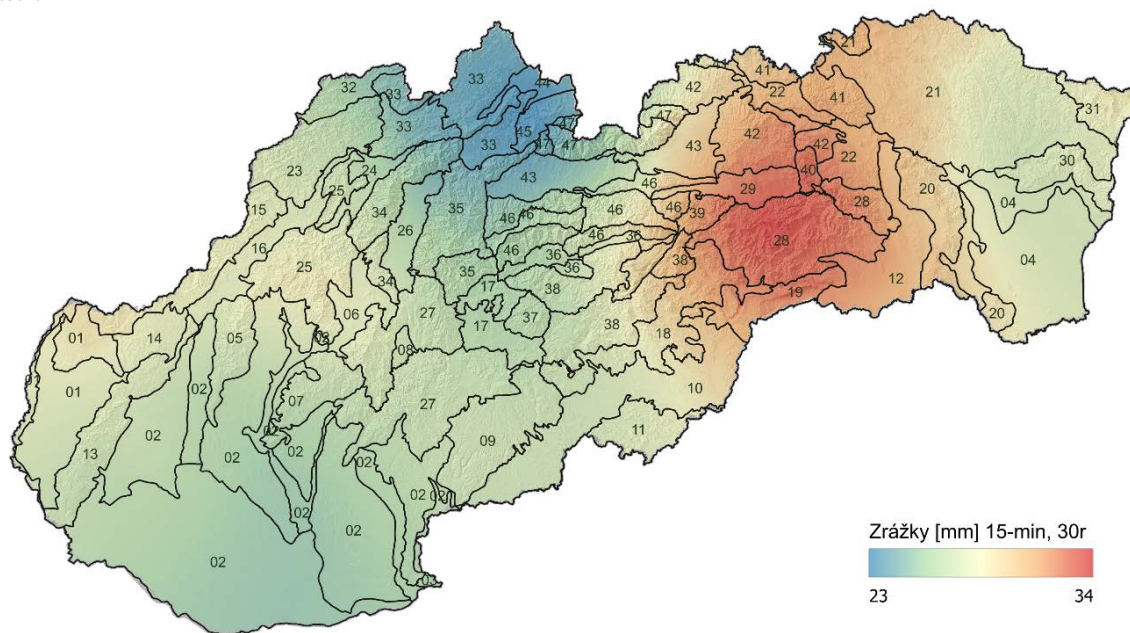
3.1 Rizikové lesné oblasti Slovenska podľa výstupov modelovaných intenzít zrážok

Jednou z hlavných výhod použitého prístupu je, že umožňuje stanoviť hodnoty intenzity pre akékoľvek trvanie zrážok a akúkoľvek dobu opakovania pre celé územie Slovenska. Obr. 4 zobrazuje maximálne intenzity pri 15-minútovom trvaní dažďa. Na obrázku sú evidentné priestorové rozdiely intenzity tohto typu krátkodobých dažďov. Oblasť na juhovýchodnom Slovensku dosahuje maximálne intenzity 15-minutovej zrážky s dobou opakovania 30 rokov na úrovni 33 mm, čo poukazuje na riziko výskytu krátkodobých intenzívnych zrážok hlavne v pohoriach Slovenského rudohoria a priľahlých oblastiach. V podobných lokalitách sa vyskytli aj maximálne 60-minutové zrážky s intenzitou okolo 50 mm (Obr. 5). Najnižšie intenzity krátkodobých zrážok v trvaní 15 a 60 minút boli namodelované pre oblasť Podunajskej nížiny (02) a sever stredného Slovenska - Stredné Beskydy (33), Veľkú Fatru (35), Oravskú kotlinu (44), Skorušinské vrchy a Zuberskú brázdou (45), a západnú časť Tatranskej oblasti (47), kde je maximálna intenzita zrážok okolo 24–26 mm počas 15-minútovej zrážky (Obr. 4) a okolo 41–43 mm v prípade 60-minútovej zrážky (Obr. 5) pri dobe opakovania 30 rokov.

V priestorovom rozložení pre územia s vyššími intenzitami, podobne ako v našej práci, boli určené najväčšie intenzity krátkodobých zrážok aj v digitálnom atlase intenzity zrážok na Slovensku (Onderka a Pecho, 2022; Onderka et al., 2023). V juhovýchodnej časti Slovenska, konkrétne vo Veporských vrchoch, Stolických vrchoch, Revúckej vrchovine, Volovských vrchoch, v ich dolinách s južnou expozíciou a na južnom úpätí Spišsko-gemerského krasu identifikovali Polčák a Mészáros (2018) vysoké úhrny predovšetkým pri juhovýchodnom cyklonálnom prúdení, ktoré v týchto pohoriach naráža na prvú výraznú orografickú prekážku. Pri prúdení z južných sektorov nad naše územie vzdušné masy narážajú na Karpatský oblúk najprv v priestore pohoria Mátra a následne na vyššom Slovenskom rudohorí. Horská prekážka spôsobuje orograficky podmienené konvektívne procesy s častým výskytom búrkovej činnosti a následnými intenzívnymi zrážkami.

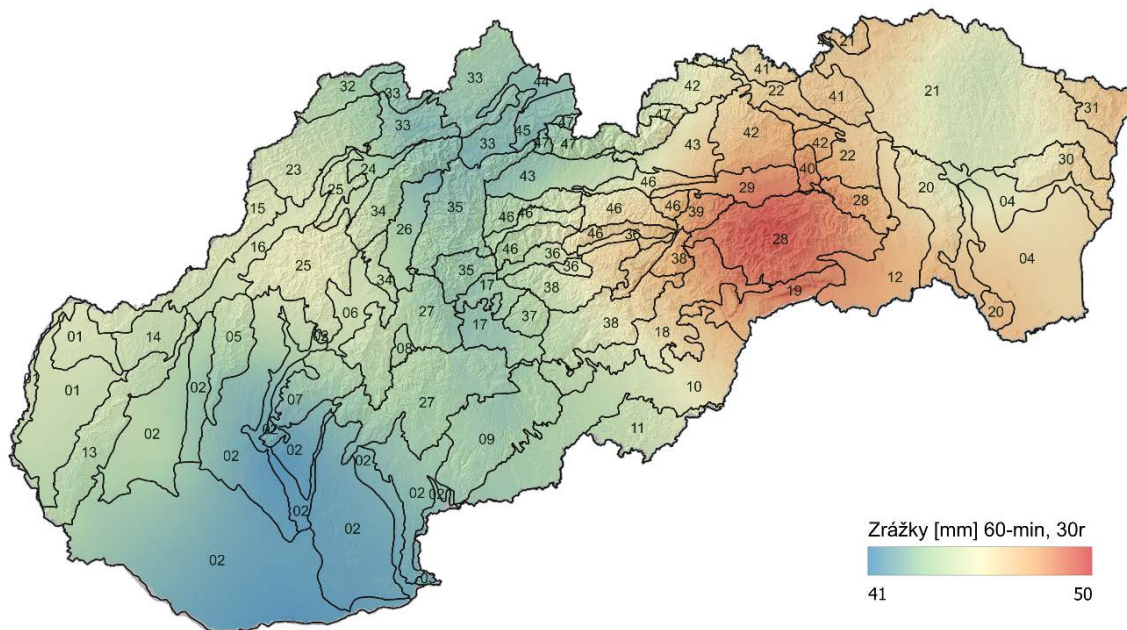
Obrázok 4. Maximálne 15-minútové zrážky s 30-ročnou dobou opakovania v lesných oblastiach Slovenska. Lesné oblasti sú označené číslom podľa Tab.1.

Figure 4. Maximum 15-minute precipitation of a 30-year return period in forest areas of Slovakia. The forest areas are listed in Tab.1.



Obrázok 5. Maximálne 60-minútová zrážky s 30-ročnou dobou opakovania v lesných oblastiach Slovenska. Lesné oblasti sú označené číslom podľa Tab.1.

Figure 5. Maximum 60-minute precipitation of a 30-year return period in forest areas of Slovakia. The forest areas are listed in Tab.1.



Toto sa prejavuje viac pri kratších časových oddieloch. Efekt náveternosti spôsobuje, že najviac zrážok spadne vo vyšších a kompaktných pohoriach, ktoré sú kolmo orientované na toto prúdenie. V našej práci boli najviac zasiahnutými lesnými oblasťami pri 15-minútových a 60-minútových zrážkach Volovské vrchy (28), Hornádská kotlina (29), Spišsko-gemerský kras (39), Branisko (40)

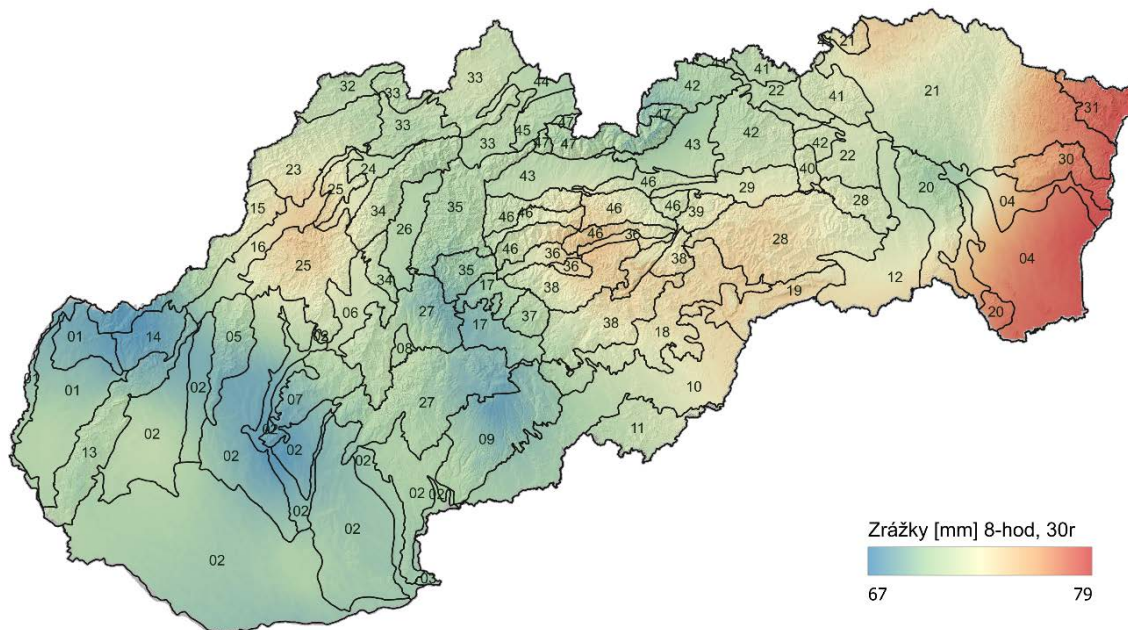
zasahujú až po južnú časť Levočských vrchov a Bachureň (42), ktoré sa značne prekrývajú s oblasťami identifikovanými v práci Polčáka a Mészároša (2018). Toto naznačuje, že krátkodobé intenzívne zrážky v trvaní 15 až 60 minút, medzera ktoré sa vyskytujú v zvýšenej miere na južných náveterných oblastiach Slovenského rudohoria, sú zrejme často spojené s južnými cyklonálnymi situáciami.

Intenzívne zrážky boli odlišne lokalizované v prípade 8 a 24-hodinových úhrnov, ktoré boli najintenzívnejšie na krajnom východe Slovenska. Pri rovnakej dobe opakovania a rovnakých vstupných údajoch ako v predchádzajúcich prípadoch sú pri hodnotení 8 a 24-hodinových zrážok najvyššie úhrny v oblasti Východoslovenskej nížiny (4), Vihorlatských vrchov (30), Bukovských vrchov (31) a vo východnej časti Nízkych Beskýd (21), a to v rozpätí

76–78 mm resp. 94–97 mm (Obr. 6, 7). Na väčšine územia sa maximálne úhrny pohybovali medzi 68–70 mm pre 8-hodinové a medzi 80–85 mm pre 24-hodinové zrážky. Najnižšie maximá 67–68 mm, resp. 79–80 mm, 8-hodinovej, resp. 24-hodinovej zrážky, boli zistené v západnej časti Bielych Karpát (15), Myjavskej pahorkatíne (14) a na severe Záhorskej nížiny (1) (Obr. 6, 7). Podobné priestorové rozmiestnenie vysokých intenzít pri niekoľkohodinových

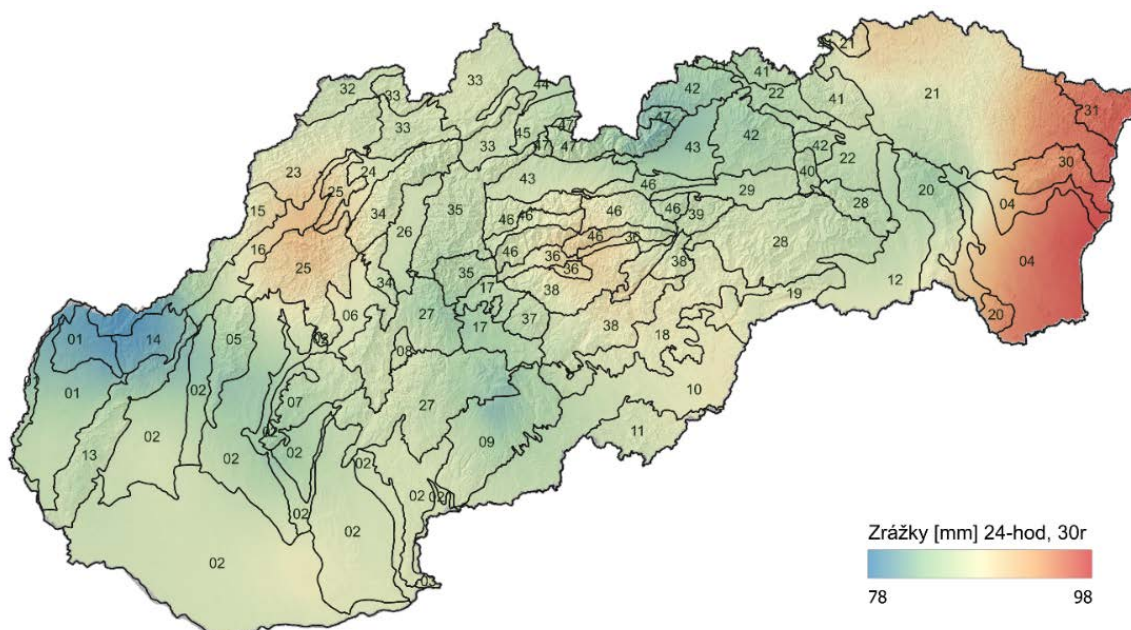
Obrázok 6. Maximálne 8-hodinové zrážky s 30-ročnou dobou opakovania v lesných oblastiach Slovenska. Lesné oblasti sú označené číslom podľa Tab.1.

Figure 6. Maximum 8-hour precipitation of a 30-year return period in forest areas of Slovakia. The forest areas are listed in Tab.1.



Obrázok 7. Maximálne 24-hodinové zrážky s 30-ročnou dobou opakovania v lesných oblastiach Slovenska. Lesné oblasti sú označené číslom podľa Tab.1.

Figure 7. Maximum 24-hour precipitation of a 30-year return period in forest areas of Slovakia. The forest areas are listed in Tab.1.



zrážkach bolo identifikované aj v digitálnom atlase intenzít zrážok na Slovensku (Onderka a Pecho, 2022, Onderka et al., 2023), pričom najvyššie hodnoty sa vyskytovali tiež na krajnom východe.

Jakubis (2023a) uviedol, že analýza 56 privalových povodní, ktoré sa vyskytli v malých horských povodiach SR v období rokov 1925–2020, odhalila veľké rozpätie intenzity zrážok, ktoré viedli k privalovým povodniam, napr. 45,2–130 mm pri 60-minútovej alebo 51 až 231,9 mm pri 24-hodinovej zrážke. Z toho vyplýva, že maximálne intenzity 60-minutových zrážok s dobou opakovania 30 rokov zistené v tejto štúdii môžu potenciálne spôsobiť bleskové povodne na veľkej časti územia Slovenska, tie 24-hodinové dokonca na celom území Slovenska. Intenzita zrážok je však iba jedným z faktorov, ktoré ovplyvňujú to, či povodeň skutočne nastane. Ďalšími významnými faktormi výsledného odtokového množstva a jeho časových zmien sú najmä geomorfologická charakteristika reliéfu (sklonitosť, reliéfová členitosť a pod.); hydrogeologická stavba povodia (charakter priepustnosti hornín, prítomnosť zvodnených vrstiev a pod.); vodná bilancia lesných porastov (intercepcia, zásoby pôdnej vody, stav lesnej cestnej siete vo vzťahu k povrchovému odtoku a pod.); celková lesnatosť povodia a štruktúra nelesnej krajiny povodia (Mind'áš et al., 1998).

Posúdenie vplyvu lesa na vznik povodne je stále aktuálnou otázkou. Rozdielnosť stanovištných podmienok i samotných lesných porastov a rôzne metódy skúmania podmienili to, že stále neexistuje jednoznačná odpoveď, akou mierou je lesný porast schopný zabrániť povrchovému odtoku alebo ho minimalizovať (Bulantová, 2012). Prevláda však názor, že lesné hospodárstvo môže vhodným obhospodarovaním lesov priaznivo ovplyvniť hydrologickú bilanciu zalesneného povodia (Čaboun a Mind'áš, 2003).

3.2 Opatrenia na úrovni lesných porastov, ktoré pomáhajú zvýšiť ich retenčnú schopnosť

Lesnícke činnosti, ako pestované zásahy, výstavba ciest a odvodňovacích drenáží, či ťažba dreva, môžu zvyšovať riziko povodne a odnos sedimentov pri extrémnych zrážkach. Znížiť toto riziko je možné voľbou adekvátnych postupov, a to správnym rozmiestnením lesov v krajine, najmä v oblastiach s malou lesnatosťou v povodiach vodných zdrojov a v regiónoch s nebezpečenstvom poškodenia pôdy eróziou (Konôpka, 2012). Lesy v lesných oblastiach, ktoré boli v tejto práci identifikované ako rizikové pre výskyt najvyšších intenzít zrážok, si z hľadiska prevencie vzniku povodní vyžadujú zvýšenú pozornosť a adekvátnu starostlivosť. Dôraz by mal byť hlavne na:

- pestovanie porastov s vysokou intercepciou a transpiráciou, dobrým zdravotným stavom a štruktúrou zvyšujúcou retenčnú schopnosť porastov,
- voľbu správnych pestovných postupov zvyšujúcich retenčnú schopnosť porastov a porastovej pôdy,
- obnovu a výstavbu nových protipovodňových opatrení v povodiach.

Po prechode vegetačným krytom sa zrážková voda dostáva do kontaktu s pôdnym prostredím. Následne buď stečie po povrchu pôdy alebo do nej vsakuje (infiltruje) a transformuje sa do jednej z foriem pôdnej vody. Retenčná

kapacita a infiltrácia lesných pôd teda zohrávajú významnú úlohu pri modifikovaní odtoku z lesných porastov pri intenzívnych zrážkach. K prekročeniu retenčnej kapacity lesných pôd môže dôjsť dvoma spôsobmi:

- pri výdatných zrážkach, keď sa retenčná kapacita pôdy nasýti a celý objem prebytkovej zrážkovej vody prechádza do odtoku,
- pri vysokej intenzite zrážok, napríklad z búrkovej činnosti, keď sa retenčná kapacita pôd nestíha naplniť a zrážková voda priamo odteká napriek tomu, že pôda nie je vodou nasýtená (Mind'áš et al., 2001).

Ak sa v procese hospodárenia lesná pôda výrazne narúša, ovplyvňuje to jej infiltračnú schopnosť. Voda, ktorá neinfiltrovala do pôdneho profilu, sa mení na povrchový odtok, ktorý významne ovplyvňuje hydrologický režim vodných tokov.

Čo sa týka hospodárskych opatrení v lesoch, je potrebné uplatňovať také postupy, ktoré zlepšujú fyzikálny profil a retenčný efekt lesných pôd, ako napríklad uplatňovanie princípov a zásad prírode blízkeho hospodárenia v lese (PBHL, Saniga, 2022), ktoré pracujú s cyklickým modelom vývoja lesa. PBHL vytvára podmienky pre plošnú, vekovú i drevinovú štruktúru (Schütz et al., 2016), ktorá umožňuje zachytiť väčšie množstvo vody v korunovom, kmeňovom aj koreňovom priestore. Zlepšiť fyzikálny profil a retenčný efekt lesných pôd pomáhajú aj úrovňové prebiecky s pozitívnym výberom s cieľom vytvorenia minimálne dvojvrstvovej štruktúry vychovávaných porastov (Saniga, 2022). Pri obnove porastov majú pozitívny účinok postupy, ktoré vytvárajú priaznivé podmienky pre vznik, uvoľnenie a odrastanie prirodzeného zmladenia stanovištné vhodných drevín. Naopak, negatívny dopad na retenčnú schopnosť lesa majú schématické postupy, výsledkom ktorých je geometrizácia ťažbových plôch (pásové clonné ruby). Vysoká koncentrácia ťažby v nich, rýchle priradovanie ďalších východísk obnovy aj v prípade listnatých porastov (hlavne buka) vedie ku riziku nezabezpečenia prirodzenej obnovy a zhoršenia vodnej retencie pôd (Saniga, 2022). Pri ťažbe dreva je vysoké riziko vzniku povodne spojené so samotným vyťahovaním stromov z porastov a budovaním približovacích liniek a odvozných ciest, ktoré vytvárajú odtokové cesty v porastoch.

Protipovodňové opatrenia na drobných vodných tokoch sú označované termínom zahrádzanie bystrín. Podľa Zákona o lesoch 326/2005 je zahrádzanie bystrín v lesoch súbor biologických, technických a organizačných opatrení v povodiach drobných vodných tokov zameraných na ochranu pred povodňami, zmiernenie erózných procesov a akumuláciu vody, najmä na účely ochrany pred požiarmi. Týmto opatrením dochádza k zadržaniu, spomaleniu a odvedeniu vody. Priekopníkom zahrádzania bystrín na Slovensku bol lesník, prof. Ing. Dr. Leo Skatula. Na Slovensku sa v rokoch 1924–1939 vypracovalo pod jeho vedením 194 projektov s návrhom úprav bystrín a strží na celkovej dĺžke 164 km, z ktorých sa zrealizovalo 123 km (Jakubis, 2023b). V súčasnosti na Slovensku zahrádzanie bystrín stagnuje a v praxi nie sú realizované adekvátne protipovodňové opatrenia na bystrinách, napriek ich akútnej potrebe. Mnohé úpravy bystrinných koryt a ich perimetrov, ktoré boli realizované pred desiatkami rokov, sú ešte funkčné, napriek

tomu, že sa venuje ich údržbe len malá pozornosť (Valtíny, 2012). Medzi najvýznamnejšie vodozádržné opatrenia, ktoré boli vybudované v poslednom desaťročí, patria protipovodňové pretekané poldre na vodných tokoch v Levočských vrchoch, ktorých výstavbu zabezpečili Vojské lesy a majetky SR (VLM SR) po rozsiahlej povodni v roku 2010. Okrem výstavby a obnovy protipovodňových zariadení má preventívny účinok aj údržba a dobrý stav odvodňovacích zariadení lesnej cestnej siete a starostlivosť o koryto vodného toku, predovšetkým zabezpečenie jeho plnej prietokovosti vrátane adekvátnej starostlivosti o brehové porasty (Jakubis, 2023a).

4 ZÁVER

Cieľom predkladanej práce bolo určiť rizikové lesné oblasti pre výskyt intenzívnych zrážok na území Slovenska, ktoré môžu byť príčinou bleskových povodní a zároveň zosumariť opatrenia v povodiach, ktoré môžu podporiť vyššiu retenciu v danej oblasti. Na základe modelovaných intenzít zrážok sme zistili, že krátkodobé zrážky v trvaní 15 a 60 minút zasahujú iné lesné oblasti ako pri zrážkach v trvaní 8 a 24 hodín. Na toto rozmiestnenie má výrazný vplyv topografia terénu a orientácia svahov voči prúdeniu. Prezentované výsledky majú praktické využitie tým, že sú lokalizované lesné oblasti, v ktorých sa viac než inde vyskytujú intenzívne zrážky, po ktorých hrozí vzostup vodných hladín alebo povodeň. V ďalšej časti sme sa venovali vplyvu opatrení v lesoch, ako diskutovaného vodozádržného prvku v krajine na vznik povodní a poukázali sme na možnosti zvýšenia retenčnej kapacity v lesnatých povodiach.

Podakovanie

Tento príspevok bol vypracovaný s podporou projektu BLEPOSK - Vývoj systému pre hodnotenie hrozby bleskových povodní a na podporu tvorby návrhov modrozelenej infraštruktúry ITMS 2014+ kód 313011BWT8.

5 LITERATÚRA

Andreassian, V., 2004. *Water and forest: from historical controversy to scientific debate*. *J. Hydrol.*, 291, 1–27.

Bara, M.–Kohnová, S.–Gaál, L.–Szolgay, J.–Hlavčová, K., 2009. *Estimation of IDF curves of extreme rainfall by simple scaling in Slovakia*. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 39, 187–206.

Bartík, M.–Jančo, M.–Střelcová, K. et al., 2016. *Rainfall interception in a disturbed montane spruce (Picea abies) stand in the West Tatra Mountains*. *Biologia* 71, 1002–1008. doi: 10.1515/biolog-2016-0119.

Bosh, J.M.–Hewlett, J.D., 1982. *A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evaporation*. *J. Hydrol.*, 55, 3–23.

Bulantová, M., 2012. *Posúdenie vplyvu využitia územia na odtokové procesy v povodí*. Dostupné online: <http://www.zvyh.sk/data/files/70.pdf>.

Calder, I.–Hofer, T.–Vermont, S.–Warren, P., 2007. *Towards a new understanding of forests and water*. *Unasylva* 229(58), 8 p. Dostupné online: <https://www.fao.org/3/a1598e/a1598e02.pdf>.

Carpenter, B.–Gelman, A.–Hoffman, M.D.–Lee, D.–Goodrich, B.–Betancourt, M.–Brubaker, M.–Guo, J.–Li, P.–Riddell, A., 2017. *Stan: A Probabilistic Programming Language*. *Journal of Statistical Software*, 76(1), 1–32. doi: 10.18637/jss.v076.i01.

Coles, S.G., 2001. *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer Verlag, London, 209 p. doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0.

Čaboun, V.–Mindáš, J., 2003. *Vodná bilancia a hydrické funkcie lesných ekosystémov v krajine. Funkcia energetickej a vodnej bilancie v bioklimatických ekosystémoch*. Zborník príspevkov, SP, Nitra. Dostupné online: <http://www.cbks.cz/sbornikRackova03/sections/4/Caboun.pdf>.

Dub, O., 1950. *Hydrologické podklady pre výpočet kanalizačných sietí*. Voda, 5.

Friesen, J.–Van Stan, J.T. II., 2019. *Early European Observations of Precipitation Partitioning by Vegetation: A Synthesis and Evaluation of 19th Century Findings*. *Geosciences*, 9(10), 423. <https://doi.org/10.3390/geosciences9100423>.

Gaál, L., 2009. *Metódy výpočtu štatistických charakteristík návrhových hodnôt úhrnov zrážok na Slovensku*. Key Publishing, Ostrava, 224 p.

Gelman, A.–Carlin, J.B.–Stern, H.S.–Rubin, D.B., 2003. *Bayesian Data Analysis*. 2nd ed. London: CRC Press, 690 p.

Gesmann, M.–Morris, J., 2020. *Hierarchical Compartmental Reserving Models*. *CAS Research Papers*, 112 s. Dostupné online: <https://www.casact.org/sites/default/files/2021-02/compartamental-reserving-models-gesmannmorris0820.pdf>.

Hanel, M.–Buishand, T.A.–Ferro, C.A.T., 2009. *A nonstationary index flood model for precipitation extremes in transient regional climate model simulations*. *J. Geophys. Res.*, 114, D15107, doi: 10.1029/2009JD011712.

Hofer, T.–Messerli, B., 2006. *Floods in Bangladesh: history, dynamics and rethinking the role for the Himalayas*. Tokyo, Japan, United Nations University Press.

Jakubis, M., 2023a. *Prívalové povodne – príčiny, poučenia a hľadanie zodpovednosti*. *LES & Letokruhy*. Dostupné online: <https://www.lesmedium.sk/casopis-letokruhy/2023/casopis-letokruhy-2023-07/privalove-povodne-priciny-poucenia-a-h-adanie-zodpovednosti>.

Jakubis, M., 2023b. *100 rokov od vzniku štátnej Služby zahraničného bystrín*. *LES & Letokruhy*. Dostupné online: <https://www.lesmedium.sk/casopis-letokruhy/2023/casopis-letokruhy-2023-09/100-rokov-od-vzniku-statej-sluzby-zahradzania-bystrin>.

Konôpka, J., 2012. *Manažment hydrických funkcií lesov*. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 58(2), 129–135.

Kostka, Z.–Holko, L., 2006. *Role of forest in hydrological cycle – forest and runoff*. *Meteorologický časopis*, 9, 143–148.

Mindáš, J.–Moravčík, M.–Stanovský, M., 1998. *Význam lesov a ich obhospodarovania z hľadiska protipovodňovej ochrany krajiny*. In: *O povodniach v roku 1998*. Bratislava, SHMÚ, 66–71.

Mindáš, J.–Škvarenina, J.–Střelcová, K., 2001. *Importance of forests in the landscape hydrological regime*. *Život. prostr.*, 35(3), 146–150.

Mráček, Z.–Krečmer, V., 1975. *Význam lesa pro lidskou společnost*. *Státní zemědělské nakladatelství Praha*, 225 s.

Onderka, M.–Pecho, J.–Markovič, L.–Nejedlík, P., 2020a. *Are rainfall extremes becoming non-stationary due to global warming? A case-study from Slovakia*. *Meteorologické zprávy*, 73, 138–145.

Onderka, M.–Pecho, J.–Nejedlík, P., 2020b. *On how rainfall characteristics affect the sizing of rain barrels in Slovakia*. *Journal of Hydrology – Regional Studies*, 32, 100747. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100747>.

- Onderka, M.–Pecho, J.–Bodinger, L.–Bičárová, S.–Lukasová, V., 2022, *Vzťahy medzi intenzitou, trvaním a frekvenciou krátkodobých dažďov určené pomocou bayesovskej inferencie parametrov GEV rozdelenia*. *Meteorologické zprávy*, 75(3), 81–88.
- Onderka, M.–Pecho, J., 2022. *Národný klimatický program Slovenskej republiky*. Zv. NKP 17/22. *Návrhové hodnoty intenzít krátkodobých dažďov na Slovensku - Lokálne odhady*. 1. vyd. Bratislava : Hydrometeorologický ústav, 2022, 500 s.
- Onderka, M.–Sokáč, M.–Mikulová, K.–Pecho, J., 2023, *Digital atlas of rainfall design intensities in Slovakia*. *Meteorologický časopis*, 26(1), 27–38. Dostupné online: https://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/MET_CASOPIS/1689773732_MC_2023-1.pdf.
- Overeem, A.–Buishand, A.–Holleman, I., 2008, *Rainfall depth-duration-frequency curves and their uncertainties*. *Journal of Hydrology*, 348,(1–2), 124–134. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.044.
- Polčák, N.–Mészáros, J., 2018, *Vplyv reliéfu na rozloženie atmosférických zrážok na Slovensku pri južných cyklónálnych situáciách*. *Geografický časopis*, 70(3), 259–272. 0016-7193. doi: 10.31577/geogrcas.2018.70.3.14.
- R Core Team, 2014, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Dostupné online: <https://www.R-project.org>.
- Saniga, M., 2022, *Lesné ekosystémy Slovenska a retenčná funkcia ich pôd*. *LES & Letokruhy*. Dostupné online: <https://www.lesmedium.sk/casopis-letokruhy/2022/casopis-letokruhy-2022-04/lesne-ekosystemy-slovenska-a-retencna-funkcia-ich-p-d>.
- Schütz, J.P.–Saniga, M.–Diaci, J. et al., 2016, *Comparing close-to-nature silviculture with processes in pristine forests: lessons from Central Europe*. *Annals of Forest Science* 73, 911–921. doi: 10.1007/s13595-016-0579-9.
- Správa o lesnom hospodárstve v Slovenskej republike za rok 2021 – Zelená správa. Bratislava, Ministerstvo pôdohospodárstva a rozvoja vidieka, Národné lesnícke centrum, 2022. Dostupné online: https://web.nlcsk.org/Zelena_sprava/Zelen%C3%A1_spr%C3%A1va_2021_s.pdf.
- Šály, R. 1988. *Pedológia a mikrobiológia*. VŠLD, Zvolen, 376 s.
- Šamaj, F.–Valovič, Š., 1973, *Intenzity krátkodobých dažďov na Slovensku*, Zborník prác Hydrometeorologického ústavu 5, Bratislava: Slovenské pedagogické nakladateľstvo, 84 s.
- Štěpánek, P.–Zahradníček, P.–Farda, A., 2013, *Experiences with data quality control and homogenization of daily records of various meteorological elements in the Czech Republic in the period 1961–2010*. *Idojaras*, 117, 123–141.
- Urcikán, P.–Imriška, L., 1986, *Stokovanie a čistenie odpadových vôd*, *Tabuľky na výpočet stôk*, Bratislava: ALFA-SNTL
- Valtýni, J., 2012, *Príspevok k histórii zahrádzania bystrín*. *Lesnícky časopis - Forestry Journal*, 58(4), 266–273.

INFORMÁCIE INFORMATION

ZHODNOTENIE HYDROLOGICKÉHO ROKA 2023

Hydrologický rok 2023 bol na základe operatívnych údajov z vybraných vodomerných staníc vyhodnotený ako suchý a podnormálne vodný rok na západe Slovenska (povodie Moravy, Malého Dunaja) a v oblasti Bielych Karpát (povodie Váh); na strednom Slovensku (povodie Dunaja, Nitry, horného Hrona a v západnej časti horného Váhu) bol vyhodnotený ako podnormálne vodný rok; v povodí Ipľa, Hrona, Slanej a na východe Slovenska (povodie Dunajca a Poradu, Hornádu a Bodrogu) ako normálne až nadnormálne vodný rok.

Úvod

Kalendárny rok 2023 prepisuje tabuľky v histórii zaznamenaných teplôt vzduchu; stal sa najteplejším rokom od začiatku meraní v roku 1850, pričom globálne teploty sa blížila k hraničnému limitu 1,5 °C [1]. Táto skutočnosť a vplyv klimatickej zmeny núti celý svet intenzívnejšie sa venovať téme sucha a nedostatku vody, a týmto problémom sa zaoberáme aj z hľadiska hydrológie. V predloženej príspevku hodnotíme hydrologický rok 2023 (1. 11. 2022 – 31. 10. 2023) z hľadiska vodnosti na základe operatívnych údajov zo 42 vodomerných staníc s dlhými radmi pozorovaní na území Slovenska, ktoré považujeme za reprezentatívne na účely tohto hodnotenia. Hodnotenie je založené na porovnaní operatívnych údajov z hydrologického roka 2023 s dlhodobými údajmi platného referenčného obdobia 1961-2000.

Klimatické pomery

Na základe analýzy súboru údajov od roku 1940 služby Copernicus Climate Change Service (C3S) sa kalendárny rok 2023 zaradí medzi najteplejšie v histórii meraní [2]. Minulý kalendárny rok je zatiaľ druhým najteplejším rokom (po roku 2020) v histórii v Európe [1]. Podľa WMO (World Meteorological Organization) teploty na celom svete v každom mesiaci kalendárneho roka 2023 od júna do decembra vytvorili nové mesačné rekordy, pričom júl a august boli dva najteplejšie mesiace v histórii meraní [3].

Z hľadiska teploty v porovnaní s dlhodobým normálom bol na Slovensku prvý mesiac hydrologického roka 2023, november 2022, teplotne normálny. Nasledovali ho mesiace teplotne nadnormálne až mimoriadne nadnormálne; medzi teplotne normálne sa opäť zaradili až mesiace apríl a máj. Letné mesiace sa ukázali ako teplotne nadnormálne až silne nadnormálne mesiace. September 2023 sa ako jediný jeseňný mesiac tiež zaradil medzi 30 najteplejších mesiacov v histórii meraní [1]. Na Slovensku sa aj posledné mesiace hydrologického roka 2023 zaradili medzi teplotne mimoriadne nadnormálne mesiace [4].

Priemerný zrážkový úhrn na našom území v hydrologickom roku 2023 bol 881 mm, čo predstavuje 115 % dlhodobého zrážkového normálu. Začiatok hydrologického roka 2023 bol zrážkovo normálny až veľmi suchý. Mesiace december 2022, január a február 2023 boli z hľadiska zrážok nadnormálne až mimoriadne nadnormálne, nasledované zrážkovo suchými mesiacmi. Medzi vlhké mesiace sa opäť zaradil august, nasledovaný septembrom, ktorý bol bohatý na zrážky, ktoré však boli priestorovo veľmi premenlivé. Záver hydrologického roka bol opäť zrážkovo mimoriadne nadnormálny (Obr. 1).

Obrázok 1. Zrážkové úhrny (v mm) na Slovensku v hydrologickom roku 2023 v porovnaní s dlhodobým normálom pre celé Slovensko (ZS – západné Slovensko, SS – stredné Slovensko, VS – východné Slovensko, SR – celé Slovensko).



Pri vyššej teplote je aj vyšší potenciálny výpar, čo bolo jedným z dôvodov, prečo bol kalendárny rok 2023 na viacerých miestach Slovenska do začiatku augusta suchý, navyše zrážkové úhrny boli vo vegetačnom období roka časovo aj územne veľmi nerovnomerne rozložené [5].

Hodnotenie roka

Hodnotenie hydrologického roka 2023 vychádza z analýzy operatívnych údajov z 42 vodomerých staníc (VS) s prevažne dlhodobým pozorovaním s prirodzeným neovplyvneným režimom odtoku. Na hodnotenie vodnosti roka sme porovnali priemerné ročné prietoky v hydrologickom roku 2023 s dlhodobými priemernými ročnými prietokmi za platné referenčné obdobie rokov 1961-2000 ($Q_{a,1961-2000}$) (Obr. 2).

Na západnom Slovensku, v povodí Moravy, Dunaja, Malého Dunaja a v povodí stredného Váhu v oblasti Bielech Karpát, väčšina hodnotených staníc dosiahla hodnoty priemerných ročných prietokov (43,8–67,7 % $Q_{a,1961-2000}$) spadajúcich do kategórie suchého roka. Výnimkou bola VS Bratislava - Dunaj, v ktorej sa priemerný ročný prietok zaradil do kategórie podnormálne vodného roka. V ostatných povodiach Slovenska sa vo väčšine VS vyskytli priemerné ročné prietoky v rozsahu 90–110 % $Q_{a,1961-2000}$. V čiastkovom povodí Nitry a v povodí horného Hrona odpovedali hodnoty priemerných ročných prietokov v hodnotených VS (71,2–84,4 % $Q_{a,1961-2000}$) kategórii podnormálne vodného roka. V povodí horného Váhu boli vo VS dosiahnuté hodnoty (74,9–88,9 % $Q_{a,1961-2000}$) kategórie podnormálne vodného roka, v severovýchodnej časti povodia Váhu (91,1–106,6 % $Q_{a,1961-2000}$) hodnoty normálne vodného roka. V povodiach Slanej, Hornádu a Bodrogu boli priemerné ročné prietoky (110,4–128,9 % $Q_{a,1961-2000}$)

hodnotené ako nadnormálne. Až v 56 % hodnotených VS boli dosiahnuté hodnoty priemerných ročných prietokov v hydrologickom roku 2023 kategorizované ako hodnoty normálne a nadnormálne vodného roka.

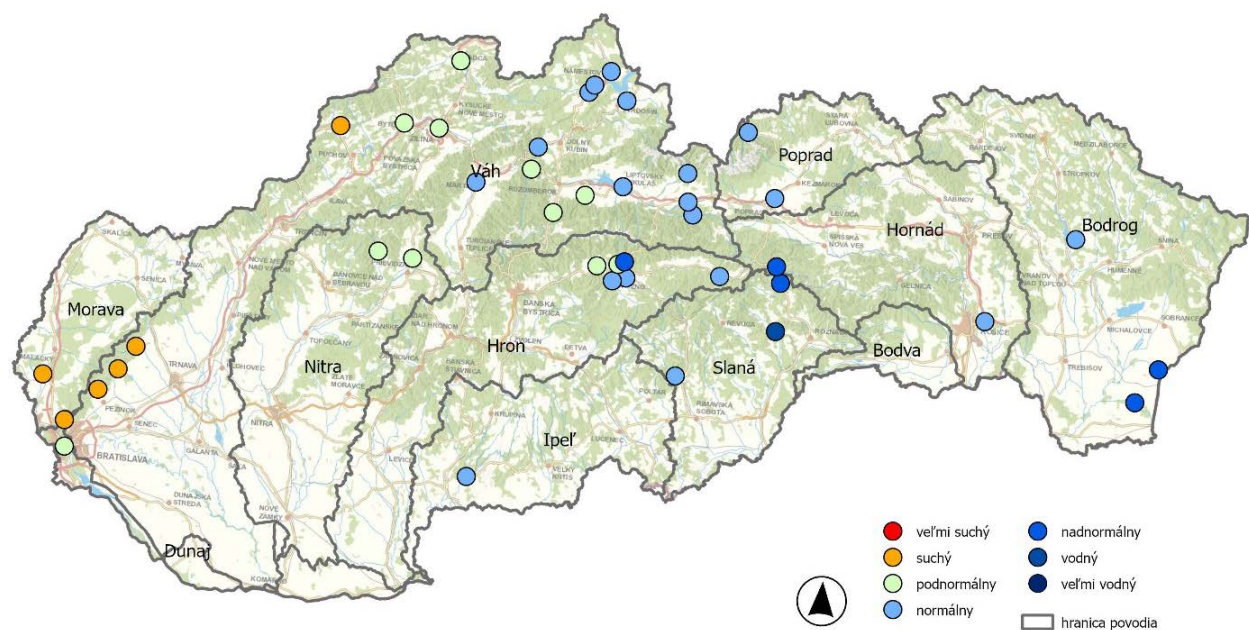
Minimálna vodnosť roka bola dosiahnutá v stanici Láb - Močiarka v povodí Dunaja (43,8 % $Q_{a,1961-2000}$, hodnota kategórie vodnosti: suchý rok) a maximálna vodnosť roka bola dosiahnutá v stanici Štítnik - Štítnik v povodí Slanej (133,9 % $Q_{a,1961-2000}$, hodnota kategórie vodnosti: vodný rok).

Priemerné mesačné prietoky

Na vyhodnotenie priemerných mesačných prietokov v riešenom hydrologickom roku sme porovnali priemerné mesačné prietoky v jednotlivých mesiacoch (Q_m) s odpovedajúcimi dlhodobými priemernými mesačnými hodnotami (Q_{ma}) za platné referenčné obdobie 1961-2000. Hodnoty percentuálneho pomeru v rozsahu 80–120 % Q_{ma} radíme medzi hodnoty blízke príslušným dlhodobým hodnotám, mesiace s Q_m menším ako 80 % Q_{ma} hodnotíme ako podnormálne až suché a za extrémne suché mesiace označujeme mesiace, ktoré dosiahli hodnoty $Q_m < 20$ % Q_{ma} . Mesiace s hodnotami Q_m vyššími ako 120 % Q_{ma} označujeme ako nadnormálne až extrémne vodné mesiace ($Q_m > 200$ % Q_{ma}).

November 2022 bol z hľadiska vodnosti suchým mesiacom (v 40 % hodnotených VS). Najvyššia priemerná teplota vzduchu, a zároveň najnižší mesačný úhrn zrážok boli zaznamenané najmä na západnom, južnom a východnom území Slovenska [6]. V povodí Váhu bola dosiahnutá minimálna hodnota percentuálneho pomeru Q_m/Q_{ma} v stanici Vydňá - Petrince (17 % Q_{ma} , kategória: extrémne suchý mesiac), a zároveň aj maximálna hodnota percentuálneho pomeru Q_m/Q_{ma} v stanici Podbanské - Belá (99 % Q_{ma} ,

Obrázok 2. Hodnotenie vodnosti v hydrologickom roku 2023 (priemerné ročné prietoky v hydrologickom roku 2023 v porovnaní s dlhodobými priemernými ročnými prietokmi za referenčné obdobie 1961–2000).



kategória: normálne vodný mesiac). Hodnoty veľmi suchého mesiaca boli zaznamenané v povodiach Dunaja (Spariská - Vydrlica, 19 % Q_m/Q_{ma}) a Malého Dunaja (Píla - Gidra, 17 % Q_m/Q_{ma}). V povodí Moravy, Nitry, Slanej, Ipl'a a Bodvy hodnoty Q_m/Q_{ma} vo VS dosahovali hodnoty kategórie suchého mesiaca. V povodí Hrona a Hornádu prevládali vo VS hodnoty podnormálne vodného mesiaca.

Nasledovali mesiace teplotne nadnormálne až mimoriadne nadnormálne (december 2022, január a február 2023), z hľadiska zrážok nadnormálne až mimoriadne nadnormálne, čo malo vplyv aj na ich vodnosť [6]. Posledný kalendárny mesiac, december 2022, bol z hľadiska vodnosti normálne vodným mesiacom (v 38 % VS). Minimálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola zaznamenaná v stanici Spariská - Vydrlica, povodie Dunaja (18 % Q_m/Q_{ma}) a maximálne hodnoty Q_m/Q_{ma} boli dosiahnuté v povodí Bodrogu, v staniach Lekárovice - Uh a Veľké Kapušany - Latorica (213 % Q_m/Q_{ma}). V povodí Moravy a Malého Dunaja boli zaznamenané vo VS hodnoty Q_m/Q_{ma} kategórie suchého mesiaca, v povodí Nitra a v niektorých VS v povodí Váhu hodnoty kategórie výrazne podnormálne vodného mesiaca. V ostatných povodiach a v ostatných VS prevládali hodnoty Q_m/Q_{ma} v kategóriách podnormálne až normálne vodného mesiaca (v 67 % VS). Január 2023 bol nadnormálne vodný mesiac (v 38 % VS). Minimálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá v stanici Píla - Gidra, povodie Malého Dunaja (55 % Q_m/Q_{ma}) a maximálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá v stanici Plášťovce - Litava, povodie Ipl'a (554 % Q_m/Q_{ma}). V povodí Dunaja boli vo VS dosiahnuté hodnoty kategórie normálne vodného mesiaca. V povodí Váhu, Dunajca a Popradu boli vo VS dosiahnuté hodnoty kategórie nadnormálne vodného mesiaca, v povodí Nitry a Hrona kategórie výrazne nadnormálne vodného mesiaca a v povodí Ipl'a, Slanej, Hornádu a Bodrogu boli vo VS dosiahnuté hodnoty extrémne vodného mesiaca. Február 2023 hodnotíme ako extrémne vodný mesiac (v 40 % VS). Minimálne hodnoty Q_m/Q_{ma} boli dosiahnuté vo VS Láb - Močiarka, povodie Moravy (53 % Q_m/Q_{ma}), v povodí Dunaja, VS Spariská - Vydrlica (59 % Q_m/Q_{ma}) a v povodí Malého Dunaja vo VS Píla - Gidra (59 % Q_m/Q_{ma}). Vo všetkých ostatných povodiach hodnoty Q_m/Q_{ma} vo VS dosahovali hodnoty kategórií normálne až extrémne vodného mesiaca (91 - 325 % Q_m/Q_{ma}). Maximálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá v povodí Váhu vo VS Oravská Jasenica - Veselianka (338 % Q_m/Q_{ma}).

Marec 2023 bol teplotne normálny až silne nadnormálny hlavne na západnom území Slovenska, v Bratislavskom kraji, na Záhorí, v oblasti Kysúc, na krajnom severe Oravy a v Prešovskom kraji. Zrážkovo bol tento mesiac mimoriadne suchý, najmenej zrážok sa zaznamenalo na Záhorí a v západných častiach Podunajskej nížiny [6]. Z hľadiska vodnosti hodnotíme tento mesiac ako normálne až nadnormálne vodný mesiac. Výnimkou sú povodia na západe Slovenska, ktoré boli ovplyvnené už vyššie spomínanými teplotami a nedostatkom zrážok. Minimálne hodnoty Q_m/Q_{ma} boli dosiahnuté v povodí Malého Dunaja, VS Píla - Gidra (21 % Q_m/Q_{ma}), ďalej vo VS v povodí Moravy, Dunaja, Ipl'a a Váhu. V povodí Nitry a Hornádu boli dosiahnuté hodnoty Q_m/Q_{ma} vo VS kategórie podnormálne

vodného mesiaca, v povodí Slanej a Bodrogu hodnoty kategórie normálne vodného mesiaca, v povodí Hrona a Váhu boli dosiahnuté hodnoty Q_m vo VS kategórie nadnormálne vodného mesiaca. V povodí Dunajca a Popradu bola vo VS Ždiar - Podspády - Javorinka dosiahnutá hodnota maximálneho Q_m/Q_{ma} (234 % Q_m/Q_{ma}).

Apríl 2023 bol teplotne normálnym až podnormálnym mesiacom, z hľadiska zrážok bol suchým až mimoriadne vlhkým mesiacom [6]. Minimálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá v povodí Ipl'a, VS Plášťovce - Litava (22 % Q_m/Q_{ma}). Do kategórie suchého mesiaca spadali aj VS v povodiach Nitry a väčšina VS v povodí Váhu (26 - 39 % Q_m/Q_{ma}). Vo väčšine VS v povodiach Moravy, Hrona a v časti VS v povodí Váhu boli dosiahnuté hodnoty Q_m/Q_{ma} odpovedajúce kategóriám výrazne podnormálne vodného mesiaca (44 - 59 % Q_m/Q_{ma}). V ostatných VS (48 %) v povodiach Dunaja, Malého Dunaja, Slanej, Dunajca a Popradu, Hornádu a Bodrogu odpovedali hodnotám kategórií podnormálne až normálne vodného mesiaca (60 - 97 % Q_m/Q_{ma}). Maximálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá v povodí Dunaja, VS Bratislava - Dunaj (97 % Q_m/Q_{ma}).

Máj 2023 bol teplotne normálny, najvyššie teploty boli zaznamenané v južných častiach západného a východného Slovenska. Najvyššie úhrny zrážok boli sústredené na západe krajiny v povodiach Moravy, Dunaja, Malého Dunaja, Nitry a dolného Váhu, ako aj v strednej časti Slovenska, v povodiach Hrona a Ipl'a [6]. Z hľadiska vodnosti hodnotíme máj ako normálne vodný mesiac (v 50 % VS). Minimálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá vo VS Lekárovice - Uh (54 % Q_m/Q_{ma}) v povodí Bodrogu, kde boli zároveň dosiahnuté jediné hodnoty Q_m/Q_{ma} vo VS odpovedajúce kategórii výrazne podnormálneho mesiaca (54 - 58 % Q_m/Q_{ma}). Hodnoty Q_m/Q_{ma} odpovedajúce kategórii podnormálne vodného mesiaca boli dosiahnuté vo VS v povodiach Moravy a časti Váhu (64 - 80 % Q_m/Q_{ma}), hodnoty normálne vodného mesiaca boli dosiahnuté vo VS v povodiach Malého Dunaja, Nitry, Hrona, Ipl'a a časti Váhu (81 - 121 % Q_m/Q_{ma}). Hodnoty nadnormálne a výrazne nadnormálne vodného mesiaca boli dosiahnuté vo VS v povodiach Dunaja, Hrona, Slanej, Dunajca a Popradu, Hornádu a v oblasti Kysúc v povodí Váhu (121 - 198 % Q_m/Q_{ma}). Maximálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá vo VS v povodí Dunaja, VS Spariská - Vydrlica (198 % Q_m/Q_{ma}).

Jún 2023 bol teplotne normálny, zrážky však boli priestorovo mimoriadne premenlivé, ovplyvnené búrkovými lejakmi [6]. Minimálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá v povodí Váhu vo VS Vydrná - Petrinovec (21 % Q_m/Q_{ma}). Vo väčšine VS v povodí Váhu, Bodrogu, Nitry a Malého Dunaja boli dosiahnuté hodnoty suchého až výrazne podnormálneho mesiaca (40 - 58 % Q_m/Q_{ma}). Vo východnej časti horného Váhu, horného Hrona a vo VS Bratislava - Dunaj, v povodí Dunaja boli dosiahnuté hodnoty podnormálne vodného mesiaca (60 - 79 % Q_m/Q_{ma}). V ostatných VS v povodiach Dunaja, Hrona, Ipl'a, Dunajca a Popradu a Hornádu boli dosiahnuté hodnoty Q_m/Q_{ma} kategórie normálne vodného mesiaca (88 - 118 % Q_m/Q_{ma}). V povodí Slanej boli vo VS dosiahnuté hodnoty Q_m/Q_{ma} kategórie výrazne nadnormálneho až extrémne vodného mesiaca, maximálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá vo VS Štítnik - Štítnik (241 % Q_m/Q_{ma}).

Leto 2023, najmä mesiace júl a august, boli teplotne silne nadnormálne najmä na západe, v Bratislavskom kraji a na východe Slovenska, v Prešovskom kraji. Júl však bol zrážkovo opäť výrazne priestorovo premenlivý, ovplyvnený búrkovými lejakmi, kým august bol jedným z najbohatších augustov na zrážky v histórii meteorologických meraní [6]. Júl 2023 bol z hľadiska vodnosti suchým až podnormálne vodným mesiacom (23–79 % Q_{ma}) vo väčšine sledovaných VS v povodí Moravy, Dunaja, Malého Dunaja, Nitry, Hrona, Ipľa a Váhu. Minimálna hodnota Q_m/Q_{ma} , odpovedajúca kategórii extrémne suchého mesiaca, bola dosiahnutá v povodí Dunaja vo VS Pezinok - Blatina (11 % Q_{ma}). Hodnoty Q_m/Q_{ma} odpovedajúce normálne až nadnormálne vodnému mesiacu boli dosiahnuté len vo VS v povodí Hrona, VS Mýto p. Ďumbierom - Štiavnička (82 % Q_{ma}), v povodí Hornádu vo VS Stratená - Hnilec (88 % Q_{ma}) a v sledovaných VS v povodí Slanej. Maximálna hodnota Q_m/Q_{ma} , odpovedajúca kategórii nadnormálne vodného mesiaca, bola dosiahnutá v povodí Slanej vo VS Štítnik - Štítnik (140 % Q_{ma}). August 2023, aj vďaka výdatným zrážkam, bol z hľadiska vodnosti normálne až nadnormálne vodným mesiacom. Minimálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá vo VS Pezinok - Blatina, v povodí Malého Dunaja (27 % Q_{ma}). Hodnoty Q_m/Q_{ma} suchého mesiaca boli dosiahnuté aj v ostatných VS Malého Dunaja a Moravy. Väčšina hodnôt Q_m/Q_{ma} v hodnotených VS dosiahla hodnoty kategórie normálne vodného mesiaca (81–109 % Q_{ma}). Až v 21 % hodnotených VS boli dosiahnuté hodnoty Q_m/Q_{ma} kategórie extrémne vodného mesiaca v povodiach Hrona, Slanej, Dunajca a Popradu, Hornádu a Váhu. Maximálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá v povodí Slanej vo VS Štítnik - Štítnik (330 % Q_{ma}).

September 2023 bol teplotne mimoriadne nadnormálny na celom území Slovenska, vo viacerých oblastiach Slovenska bol bohatší na zrážky. Deficit zrážok bol zaznamenaný na západe Slovenska, v oblasti Bratislavy, Bielych Karpát a Javorníkov [6], čo malo vplyv na stav v povodiach v týchto častiach Slovenska. Hodnoty Q_m/Q_{ma} suchého a výrazne podnormálne vodného mesiaca boli dosiahnuté v povodiach Moravy, Dunaja, Malého Dunaja, Nitry a horného Váhu. Minimálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá v povodí Váhu vo VS Vydná - Petrínovec (13 % Q_{ma}), odpovedala hodnotám kategórie extrémne suchého mesiaca. V ostatných VS v povodiach Hrona, Ipľa, Slanej, Dunajca a Popradu, Hornádu a Váhu boli dosiahnuté hodnoty Q_m/Q_{ma} kategórií podnormálne až normálne vodného mesiaca (61–111 % Q_{ma}). V povodí Hornádu, VS Košické Oľšany - Torysa boli dosiahnuté hodnoty nadnormálne vodného mesiaca (128 % Q_{ma}), ako aj v povodí Váhu, kde vo VS Čierny Váh - Ipolitica bola dosiahnutá maximálna hodnota Q_m/Q_{ma} (138 % Q_{ma}).

Október 2023, záver hydrologického roka 2023, bol teplotne nadnormálny; mimoriadne nadnormálne vysoké teploty boli namerané najmä na území Bratislavského kraja, pričom na celom území Slovenska bolo zaznamenaných niekoľko zrážkovo významnejších poveternostných situácií [6]. Z hľadiska vodnosti hodnotíme mesiac október ako normálne vodný mesiac na väčšine územia Slovenska. Výnimkou sú povodia na západe Slovenska, kde v povodí

Moravy, Dunaja, Malého Dunaja, Nitry a v západnej časti horného Váhu boli vo VS dosiahnuté hodnoty Q_m/Q_{ma} odpovedajúce kategórii suchého a výrazne podnormálne vodného mesiaca (25–59 % Q_{ma}). Minimálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá vo VS Spariská - Vydrice v povodí Dunaja (25 % Q_{ma}). V ostatných sledovaných VS v povodiach Nitry, Hrona, Ipľa, Slanej, Dunajca a Popradu, Hornádu, Bodrogu a Váhu boli dosiahnuté hodnoty Q_m/Q_{ma} odpovedajúce hodnotám podnormálne až normálne vodného mesiaca (62–109 % Q_{ma}). V povodí Váhu, vo VS Zubrohlava - Polhoranka, Oravská Jasenica - Veselianska, Lokca - Biela Orava a Čierny Váh - Ipolitica a v povodí Slanej vo VS Štítnik - Štítnik boli dosiahnuté hodnoty Q_m/Q_{ma} odpovedajúce kategórii nadnormálne vodného mesiaca (121–154 % Q_{ma}). Maximálna hodnota Q_m/Q_{ma} bola dosiahnutá v povodí Popradu vo VS Ždiar - Podspády - Javorinka (167 % Q_{ma}).

Extrémy

Minimálne priemerné denné prietoky dosiahnuté v hydrologickom roku 2023 sme porovnali s dlhodobými hodnotami M-denných prietokov stanovenými za referenčné obdobie 1961-2000. Následne bolo toto porovnanie použité na hodnotenie hydrologického sucha. Riziko začínajúceho sa suchého obdobia predstavujú priemerné denné prietoky Q_d , ktoré poklesnú pod úroveň $Q_{330d,1961-2000}$. Z hodnotených VS v hydrologickom roku 2023 boli hodnoty priemerných denných prietokov menšie ako $Q_{330d,1961-2000}$ minimálne jeden deň v hydrologickom roku v 35 zo 42 vodomerných staníc.

Vo VS Podbanské - Belá v povodí Váhu bola dosiahnutá Q_d na úrovni 180–270-denného dlhodobého prietoku. Hodnoty Q_d kategórie $Q_{270-330d,1961-2000}$ boli dosiahnuté v povodí Hrona (VS Zlatno - Hron), v povodí Ipľa (VS Plášťovce - Litava), v povodí Slanej (VS Lehota nad Rimavicou - Rimavica) a v povodí Váhu (VS Čierny Váh - Ipolitica a VS Lokca - Biela Orava). V ostatných povodiach v hodnotených VS hodnoty Q_d dosahovali hodnoty kategórií $Q_{330-355d,1961-2000}$ až $Q_{355-364d,1961-2000}$. Hodnoty Q_d zodpovedajúce hodnotám kategórie $Q_{364d,1961-2000}$, resp. menšie, boli dosiahnuté v povodí Hrona, VS Hronec - Čierny Hron, ďalej v 41 % hodnotených VS v povodí horného Váhu a vo všetkých hodnotených VS v povodí Malého Dunaja.

Hydrologický rok 2023 patril medzi roky s množstvom výrazných aj menej výrazných povodňových situácií [7]. Podľa operatívnych údajov boli úvodné mesiace hydrologického roka bez výraznejších vzostupov hladín, vzostupy boli zaznamenané najmä v západnej polovici Slovenska a v povodiach Východoslovenskej nížiny. V januári nastali už výrazné vzostupy hladín, najmä v povodiach horného Váhu, Hrona, Ipľa a Bodrogu. Vo VS Veľké Kapušany - Latorica v povodí Bodrogu bola maximálna kulminácia $264,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ktorá odpovedá 2- až 5-ročnému prietoku. Vo februári boli v povodí Váhu v dvoch VS dosiahnuté maximálne kulmináčnne prietoky na úrovni 2- až 5-ročného prietoku, vo VS Lokca - Biela Orava ($130,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a Párnica - Zázrivka ($43,60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). V máji nastali výrazné vzostupy hladín na väčšine tokoch na území Slovenska.

V povodí Moravy, vo VS Láb - Močiarka, bol dosiahnutý maximálny kulminačný prietok $2,986 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na úrovni 5- až 10-ročného prietoku. Najvýraznejšie vzostupy boli zaznamenané v mesiaci august 2023 vďaka mimoriadne veľkému množstvu zrážok. V povodí Dunajca a Popradu, vo VS Poprad - Matejovce - Slavkovský potok bol dosiahnutý maximálny kulminačný prietok $14,82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na úrovni 5- až 10-ročného prietoku. V povodí Hornádu bol dosiahnutý maximálny kulminačný prietok na úrovni 20- až 50-ročného prietoku vo VS Stratená - Hnilec ($26,49 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). V povodí Slanej, vo VS Štítnik - Štítnik, bol dosiahnutý maximálny kulminačný prietok $25,08 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na úrovni 5-ročného prietoku, vo VS Dobšiná - Dobšinský potok bol dosiahnutý prietok $16,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na úrovni 20-ročného prietoku, vo VS Plešivec - Štítnik (mimo hodnotených VS v tomto príspevku) bol dosiahnutý 100-ročný kulminačný prietok (Obr. 3).

Záver

Hydrologický rok 2023 môžeme na základe operatívnych údajov z hľadiska vodnosti hodnotiť ako suchý až podnormálne vodný rok na západnom území Slovenska, v povodiach Moravy, Dunaja, Malého Dunaja, Nitry, časti Váhu a časti horného Hrona. V povodiach stredného a východného Slovenska (povodia Hron, Ipeľ, Váh, Slaná, Dunajec

a Poprad, Hornád a Bodrog) sa javil ako normálne až nadnormálne vodný rok. Najnižšia relatívna hodnota priemerného ročného prietoku bola dosiahnutá v povodí Moravy, vo VS Láb - Močiarka, a najvyššia hodnota relatívneho priemerného ročného prietoku bola dosiahnutá v povodí Slanej, VS Štítnik - Štítnik. Najnižšie hodnoty mesačnej vodnosti boli dosiahnuté v hodnotených VS v povodí Váhu naprieč celý rok a najvyššia hodnota mesačnej vodnosti bola dosiahnutá vo VS Podbanské - Belá, v povodí Váhu vo februári 2023. Minimálne hodnoty mesačnej vodnosti sa vyskytovali počas celého hydrologického roka 2023; až v 43 % hodnotených VS boli minimálne hodnoty mesačnej vodnosti vo VS dosiahnuté v mesiacoch november a december 2022 (celkovo sa kalendárny rok 2022 zaradil medzi najsuchšie roky v poslednom desaťročí); v 36 % hodnotených VS sa minimálne hodnoty mesačnej vodnosti vyskytovali najmä v septembri a októbri 2023 na západnom území Slovenska, v povodí Moravy, Nitry a na východnom území Slovenska, v povodí Bodrogu.

Na základe predbežných analýz vykonaných na operatívnych údajoch sa hydrologický rok 2023 hodnotí ako vodnejší v porovnaní s hydrologickým rokom 2022 [8] napriek vplyvu rekordne vysokých teplôt v mesiacoch júl, august a september, ktorých účinky boli znížené vďaka väčším úhrnom zrážok.

Obrázok 3. Stopy po povodni vo vodomernej stanici Plešivec na Štítniku (foto K. Slivková).

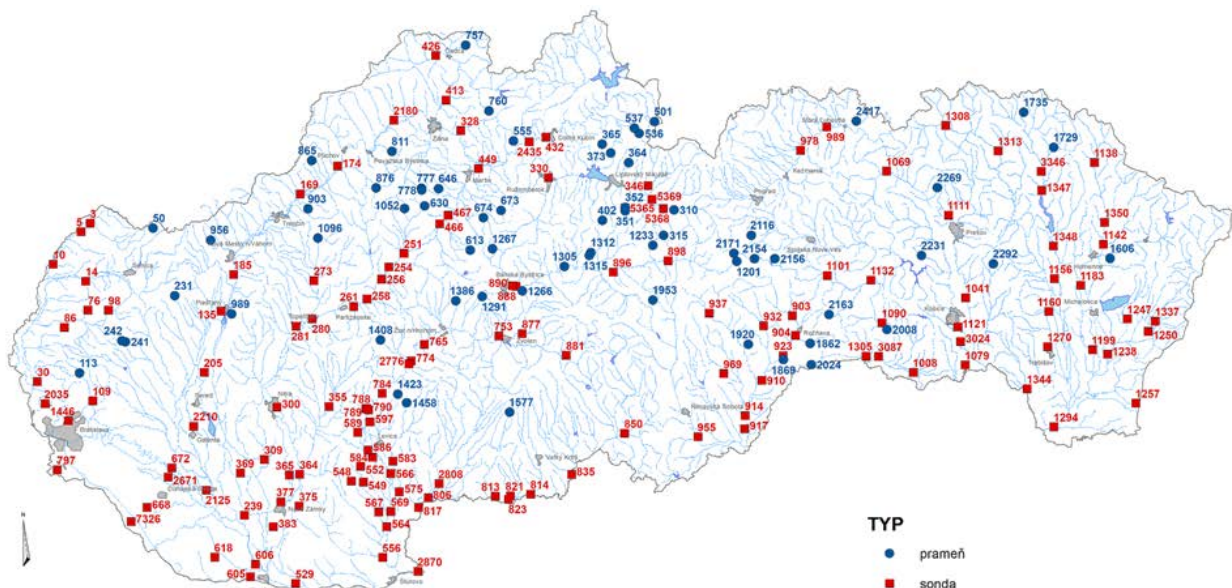


LITERATÚRA

- [1] Copernicus: 2023 is the hottest year on record, with global temperatures close to the 1.5°C limit. Copernicus. [Online] 9. 01 2024. [Dátum: 23. 02 2024.] <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2023-hottest-year-record>.
- [2] Global Climate Highlights 2023. Copernicus. [Online] 01 2024. [Dátum: 22. 02. 2024] <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023>.
- [3] WMO confirms that 2023 smashes global temperature record. World Meteorological Organization. [Online] 12. 01 2024. [Dátum: 22. 02. 2024] <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record>.
- [4] Lapin, Milan. Mesačné úhrny zrážok v 3 regiónoch SR a v celej SR. [Online] [Dátum: 15. 01.2024] <https://milanlapin.estranky.sk/clanky/tabulka-mesacnych-uhrnov-zrazok-na-slovensku.html>.
- [5] Prehľad zmien teploty vzduchu a úhrnov atmosférických zrážok na Slovensku v uplynulom roku. [Online] [Dátum: 12.01.2024] <https://milanlapin.estranky.sk/clanky/aktualne-zmeny-teploty-a-zrazok-na-slovensku>.
- [6] Bulletin Meteorológia a Klimatológia. Odbor Klimatologická služba. [Online] <https://www.shmu.sk/sk/index.php?page=1613>.
- [7] Úsek Hydrologická služba, Úsek Centrum predpovedí a výstrah. Mesačné hodnotenia hydrologickej situácie. Aktuality SHMÚ. [Online] <https://www.shmu.sk/sk/index.php?page=2049>.
- [8] Katarína Kotríková, Lotta Blaškovičová, Katarína Jeneiová, Soňa Liová, Jana Podolinská, Katarína Slivková, Beáta Sičová. Zhodnotenie hydrologického roka 2022. Meteorologický časopis. [Online] 2023. [Dátum: 29. 02. 2024] <https://www.shmu.sk/sk/index.php?page=31&rok=2023&cislo=1>. ISSN 1335-339X.

Katarína Kotríková, Lotta Blaškovičová, SHMÚ, Bratislava
Soňa Liová, SHMÚ, Žilina
Katarína Slivková, SHMÚ, Banská Bystrica
Beáta Sičová, SHMÚ, Košice

Obrázok 1. Priestorové rozmiestnenie hodnotených objektov.



PREHĽAD SITUÁCIE V PODZEMNEJ VODE V HYDROLOGICKOM ROKU 2023

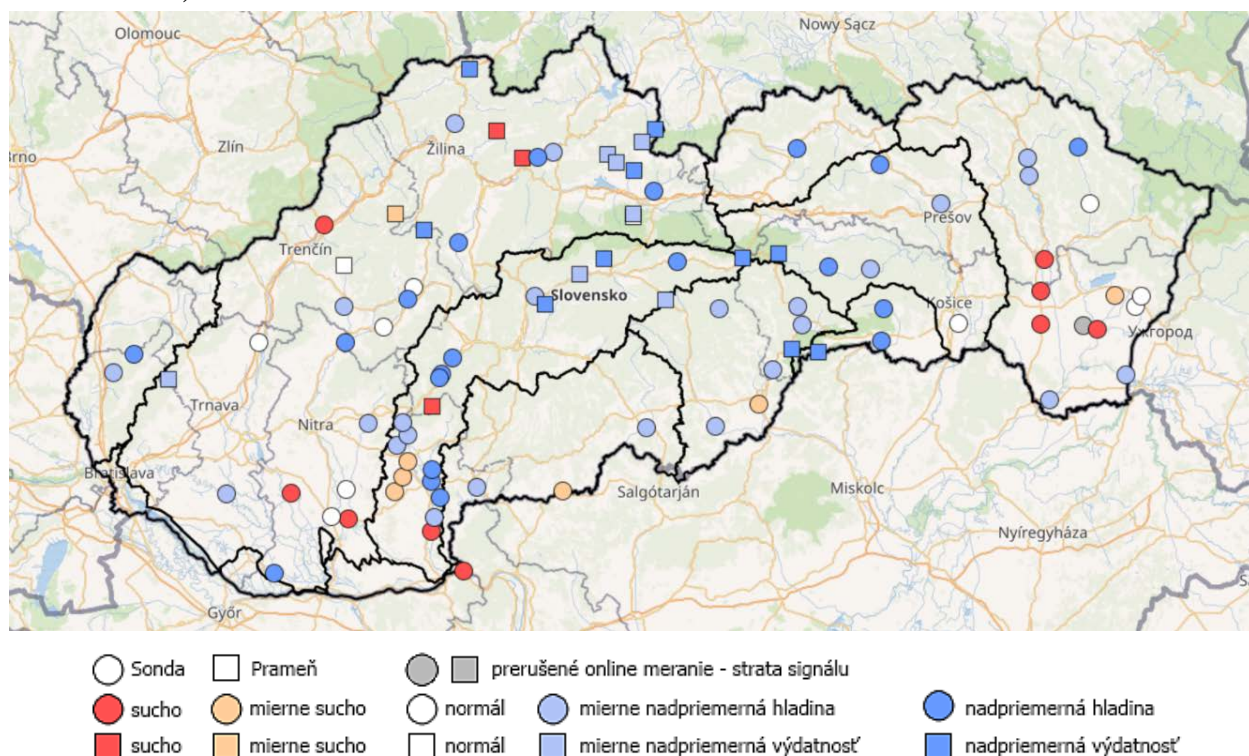
Z hľadiska dopĺňania zásob podzemnej vody bol hydrologický rok 2023 v porovnaní s rokom 2022 priaznivý. Dopĺňanie zásob podzemnej vody prebiehalo najmä počas zimných mesiacov. V letných mesiacoch hladiny podzemnej vody a výdatnosti prameňov dosahovali väčšinou priemerné hodnoty. Hydrologický rok 2023 ako celok hodnotíme ako priemerný. Na hodnotenie hydrologického roka 2023 boli použité operatívne údaje, ktoré boli namerané na vybraných objektoch štátnej hydrologickej siete podzemnej vody Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ). Údaje, ktoré vstupovali do hodnotenia, boli hladiny podzemnej vody a výdatnosti prameňov.

Úvod

Hodnotenie hydrologického roka 2023 v podzemnej vode vychádzalo zo spracovania operatívnych údajov v mesačnom kroku z vybraných 206 objektov (z toho 141 sond a 65 prameňov; Obr. 1), ktoré patria do štátnej hydrologickej siete podzemnej vody SHMÚ. Objekty, z ktorých údaje vstupovali do hodnotenia, boli vybrané tak, aby rovnomerne pokrývali územie Slovenska, a získala sa tak priestorová a objektívna informácia o stave zásob a zmenách hydrologického režimu podzemnej vody počas roka. Pri výbere objektov sa prihliadalo aj, aby boli aj antropogénne neovplyvnené a mali nenarušenú homogenitu údajov časových radov.

Z uvedených 206 pozorovacích objektov poskytuje 119 objektov (86 sond a 33 prameňov; Obr. 2) online prenos monitorovaných údajov, ktoré sú voľne dostupné pre širokú verejnosť na domovskej internetovej stránke SHMÚ https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pzv_kvantita. Tieto referenčné objekty sú výrazne zamerané na hodnotenie sucha a dopadu zmien klímy na podzemnú vodu.

Obrázok 2. Priestorové rozmiestnenie objektov s online prenosom dát (na obrázku je zachytená situácia v podzemnej vode z dňa 13. 01. 2023).



Údaje z týchto objektov umožňujú priebežne sledovať zmeny v hydrologickom režime podzemnej vody v dennom kroku na Slovensku. Na uvedenej internetovej adrese je možné získať informáciu aj spätne, a to až do roka 2017, kedy tento online prenos dát na Slovensku začal. Informácie o hodnotených jednotlivých mesiacoch za podzemnú vodu sú obsahom správ v sekcii Aktuality na stránke SHMÚ <https://www.shmu.sk/sk/?page=2049>, kde sa toto hodnotenie hydrologickej situácie nachádza.

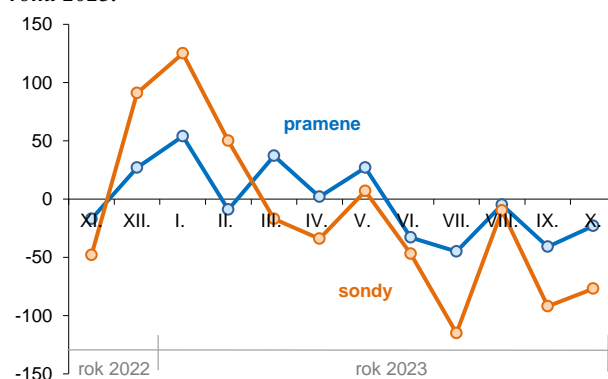
Hodnotenie hydrologického roka 2023

Hydrologický rok 2023 bol vyhodnotený ako priaznivý pre dopĺňanie zásob podzemnej vody, ktoré prebiehalo najmä počas zimných mesiacov (Obr. 3 a 4). V letných mesiacoch údajové hodnoty dosahovali väčšinou priemerné hodnoty s výnimkou mesiaca júl, kedy prevládala hladina podzemnej vody a výdatnosť prameňov výrazne nižšie, teda nižšie ako je ich dlhodobý normál referenčného obdobia 1981-2010 a došlo k ich najvýraznejším poklesom (Obr. 3).

Priebeh dopĺňania zásob podzemnej vody v jednotlivých mesiacoch koreluje s priebehom úhrnu zrážok za dané obdobie v % normálu 1991-2020 (Obr. 5). Najlepšie hodnotenými mesiacmi z hľadiska dopĺňania zásob podzemnej vody boli mesiace január a február, ktoré boli zaradené medzi jediné nadpriemerné mesiace. Najhorším mesiacom, teda najsuchším z hľadiska podzemnej vody, bol prvý mesiac v hydrologickom roku, november 2022. V tomto mesiaci ešte doznievala nepriaznivá situácia z predošlého hydrologického roka, ktorý bol vyhodnotený ako podpriemerný - suchý. Medzi podpriemerné mesiace

boli zaradené aj mesiace december, apríl a júl. Október bol zaradený medzi priemerné – mierne podpriemerné mesiace.

Obrázok 3. Kumulatívne zobrazenie medzimesačných zmien v objektoch podzemnej vody (nárasty/poklesy hladiny podzemnej vody, resp. výdatnosti prameňov) v hydrologickom roku 2023.

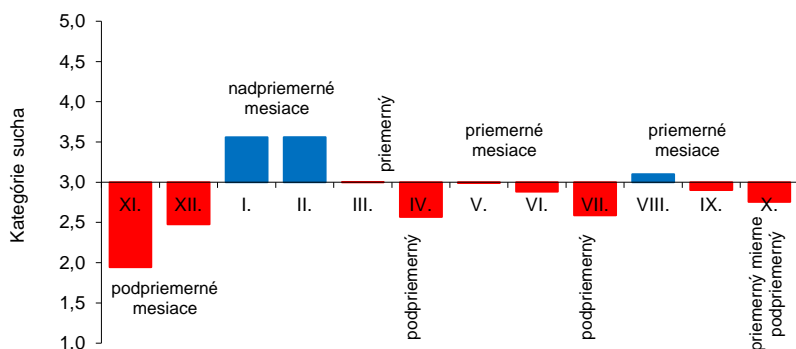


Prehľad situácie v podzemnej vode v mesačnom kroku

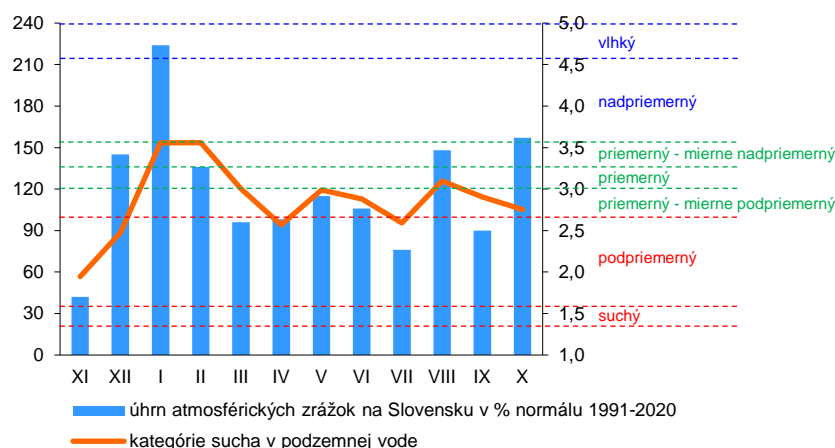
Nerovnomerný výskyt zrážok v závere predošlého hydrologického roka spôsobil, že nie u všetkých prameňov a sond došlo k dostatočnému dopĺňaniu zásob podzemnej vody.

November, ako začiatok hydrologického roka, nezačal pre podzemnú vodu veľmi priaznivo. Zaradil sa medzi početné mesiace s deficitom zrážok (Bulletin SHMÚ, č. 11, 2022). Hoci sa vyskytli zdroje s hladinou podzemnej vody a výdatnosťou prameňov vyššou ako je ich dlhodobý normál referenčného obdobia (1981–2010), naďalej

Obrázok 4. Hodnotenie mesiacov hydrologického roka 2023.



Obrázok 5. Porovnanie situácie v podzemnej vode v jednotlivých mesiacoch s úhrnom atmosférických zrážok v % normálu 1991-2020 na hydrologický rok 2023; (zdroj údajov úhrnov zrážok: SHMÚ, <https://www.shmu.sk/sk/?page=1610>).



prevládalo sucho a mierne sucho s najväčšou intenzitou na takmer celom území. (Obr. 6). Na základe celkového hodnotenia bol november hodnotený ako podpriemerný (suchý mesiac). Zároveň patril k najsuchším mesiacom hodnoteného obdobia.

Mesiac **december** bol v podzemnej vode hodnotený ako podpriemerný. Na rozdiel od predchádzajúceho mesiaca spadlo v tomto mesiaci už viac zrážok. Na rozhraní medzi prvou a druhou dekadou mesiaca zasiahla časť východného Slovenska a niektoré regióny na východe stredného Slovenska snehová kalamita, ktorá prispela významnou mierou k vyšším mesačným úhrnom zrážok (Bulletin SHMÚ, č. 12, 2022). Táto zrážková situácia mala vplyv na mierne zlepšenie situácie v druhej dekáde mesiaca, hlavne v povodí stredného Váhu, Hrona, Ipľa, Slanej, Bodvy a Hornádu. Nárast hladiny podzemnej vody a výdatnosť prameňov sa výraznejšie prejavil až v poslednej dekáde decembra.

V **januári** 2023 pokračoval trend pribúdania atmosférických zrážok. Na rozhraní medzi prvou a druhou dekadou mesiaca zasiahli predovšetkým regióny na pomedzí západného a stredného Slovenska výdatné dažde (Bulletin SHMÚ, č. 1, 2023), čo malo pozitívny vplyv na hladiny a výdatnosť prameňov podzemnej vody (Obr. 7). V druhej dekáde takmer vo všetkých povodiach, s výnimkou Bodrogu a dolného Váhu, prevládali hladiny podzemnej vody a výdatnosť prameňov výrazne vyššie ako je ich dlhodobý

normál 1981-2010. Začiatkom tretej dekády až do konca januára došlo k doplneniu zdrojov podzemnej vody aj v povodí Bodrogu, kde po dlhom čase prevládala hladina podzemnej vody a výdatnosť prameňov vyššie ako je ich dlhodobý normál referenčného obdobia 1981-2010. Z hľadiska podzemnej vody hodnotíme tento mesiac ako nadpriemerný.

Z hľadiska podzemnej vody je aj mesiac **február** zaradený medzi nadpriemerné mesiace. Hoci v priebehu mesiaca hladina podzemnej vody a výdatnosť prameňov mierne klesala, napriek tomu však prevládali nadpriemerná hladina podzemnej vody a výdatnosť prameňov.

Mesiac **marec** je celkovo zaradený medzi priemerné mesiace. Oproti predošlému mesiacu došlo v marci k poklesom na zdrojoch podzemnej vody, a to hlavne v západnej a strednej časti územia. Hladina podzemnej vody a výdatnosť výrazne nižšia ako je dlhodobý normál 1981-2010 sa vyskytovali najmä v povodí Váhu a Hrona.

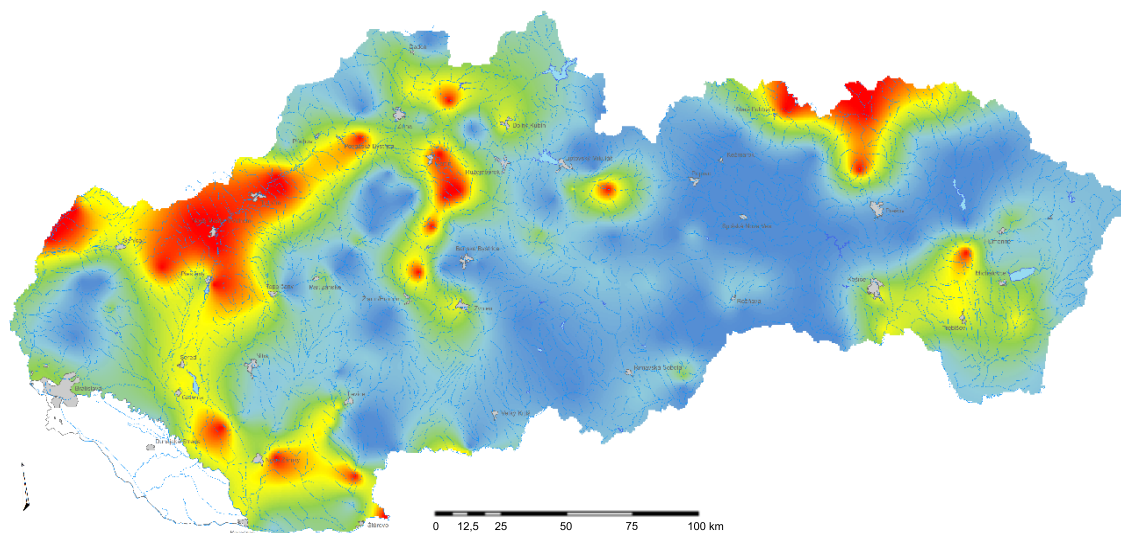
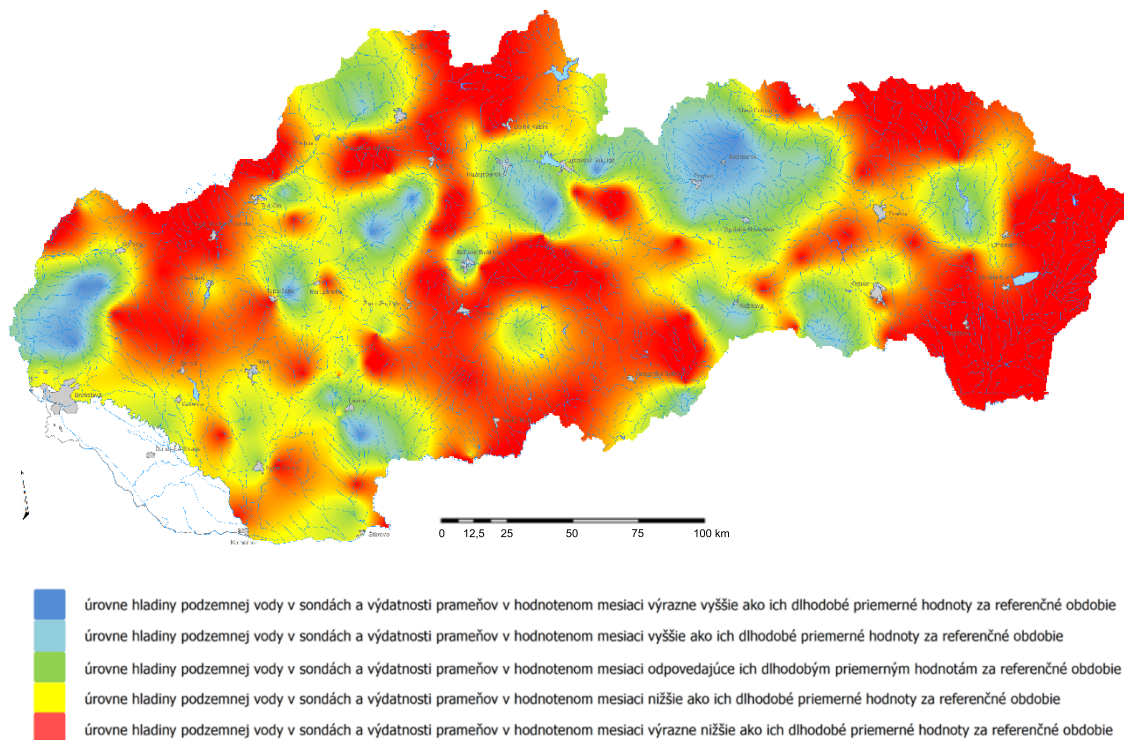
Apríl v podzemnej vode bol celkovo zaradený medzi podpriemerné mesiace. Na 51 % hodnotených objektoch sa vyskytli hladina a výdatnosť prameňov výrazne nižšie ako je ich dlhodobý normál v povodiach

Váhu, Hrona, Slanej a Ipľa. V apríli, podobne ako vo februári a v marci, boli zaznamenané dosť veľké rozdiely v územnom rozložení atmosférických zrážok (Bulletin SHMÚ, č. 4, 2023), čo sa prejavilo aj na dopĺňaní zásob podzemnej vody. Nadpriemerná a mierne nadpriemerná hladina a výdatnosť prameňov sa vyskytli na 36 % hodnotených objektoch, a to hlavne v povodí Moravy, Bodvy a Hornádu. Hladina a výdatnosť prameňov zodpovedajúca normálu sa vyskytovali na 11 % hodnotených objektoch, najmä v povodí Bodrogu.

V máji boli mesačné úhrny zrážok ešte vyššie ako v apríli, ale podobne ako v apríli, boli priestorovo dosť rozdielne (Bulletin SHMÚ, č. 5, 2023). To sa prejavilo aj na zásobách podzemnej vody. Mesiac **máj** z hľadiska priemerných mesačných hodnôt hodnotíme ako nadpriemerný v povodiach Moravy, Slanej, Bodvy a Hornádu. V povodiach Popradu, Hrona, Ipľa a Váhu bol hodnotený ako priemerný. Medzi oblasti Slovenska, kde spadlo v máji menej zrážok, patrilo rozsiahlejšie územie Východoslovenskej nížiny (Bulletin SHMÚ, č. 5, 2023), čo sa prejavilo na výskyte podpriemerných hodnôt v povodí Bodrogu. Celkovo máj hodnotíme ako priemerný mesiac.

Jún bol v podzemnej vode hodnotený ako priemerný mesiac. Na začiatku mesiaca prevládali nadpriemerné hodnoty, ale už na konci mesiaca mali prevahu podpriemerné hodnoty hladín podzemnej vody a výdatnosti prameňov.

Obrázok 6. Situačná mapa priestorového mesačného hodnotenia podzemnej vody na Slovensku; hodnotený mesiac november 2022.



Obrázok 7. Situačná mapa priestorového mesačného hodnotenia podzemnej vody na Slovensku; hodnotený mesiac január 2023.

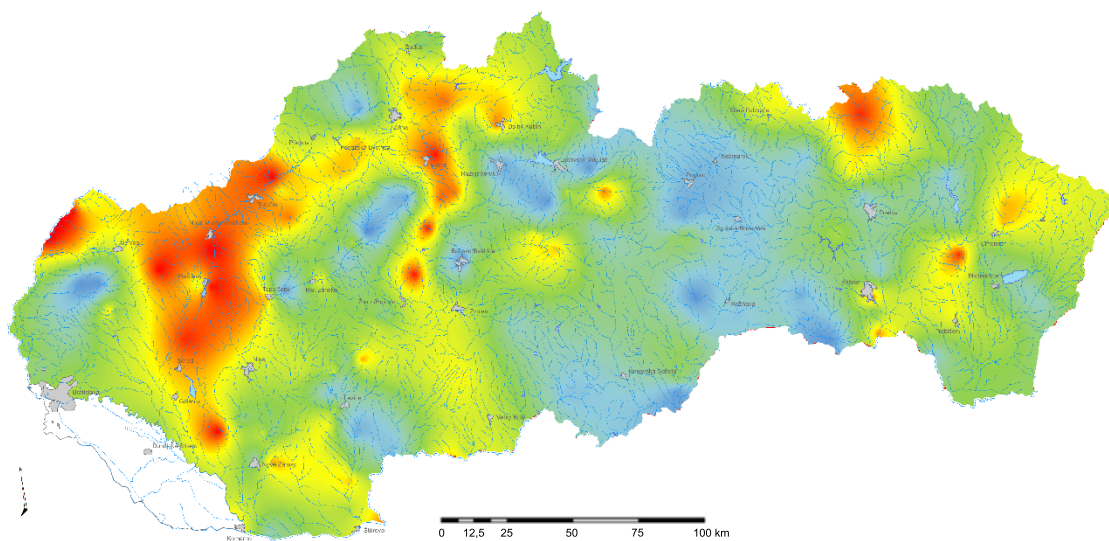
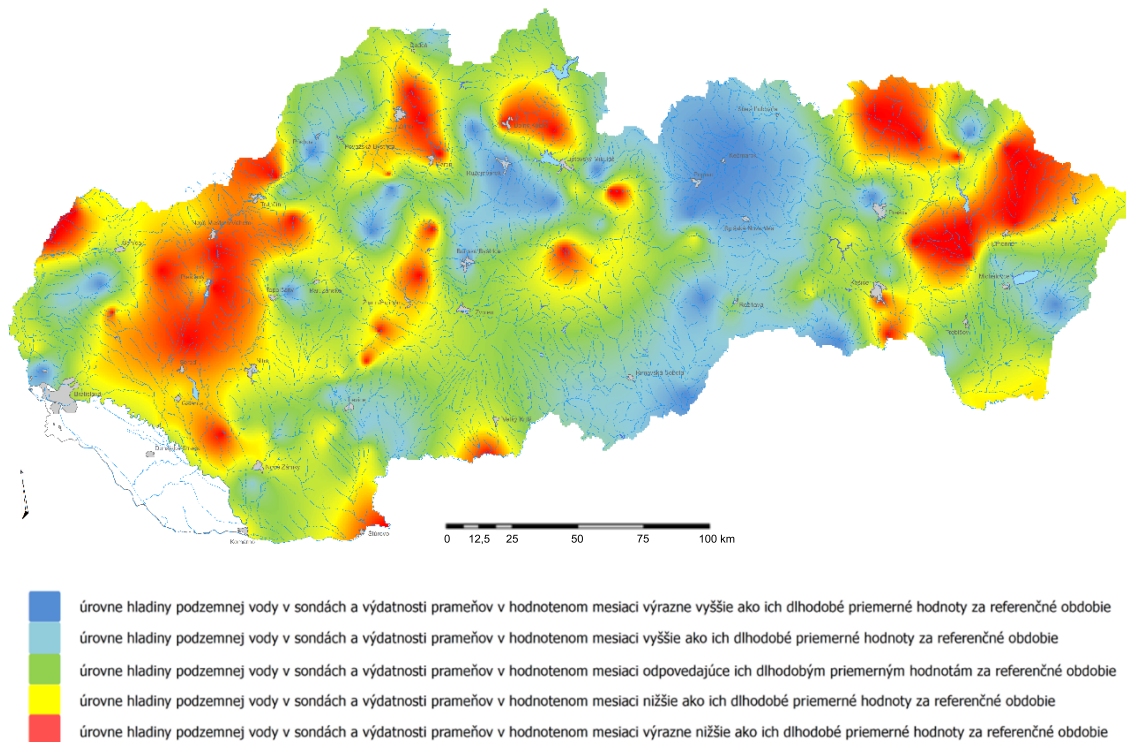
V podzemnej vode bol **júl** hodnotený ako podpriemerný mesiac. Podpriemerné hodnoty hladiny podzemnej vody a výdatnosti prameňov prevládali hlavne v povodí Váhu, Bodrogu a Popradu. Naopak, nadpriemerné hodnoty podzemnej vody a výdatnosť prameňov prevládali v povodí Slanej a Bodvy. Priemerné hodnoty zodpovedajúce normálu prevládali v povodí Hrona, Ipľa a Hornádu.

August bol v podzemnej vode hodnotený ako priemerný mesiac. V rámci jednotlivých povodí prevládali nadpriemerné a mierne nadpriemerné hladiny a výdatnosť prameňov v povodí Bodvy, Hornádu, Moravy a Slanej. Priemerné hladiny a výdatnosť prameňov prevládali v povodi

Wahu, Hrona, Ipľa a Bodrogu. Od začiatku mesiaca do konca mesiaca došlo k nárastu hladiny podzemnej vody a výdatnosti prameňov na 79 % hodnotených objektov. Na nárast týchto hodnôt má pozitívny vplyv úhrn zrážok v tomto mesiaci a mesiac august sa týmto zaradil do skupiny zrážkovo najbohatších augustov v histórii meteorologických meraní na Slovensku (Bulletin SHMÚ, č. 8, 2023).

Aj mesiac **september** bol celkovo hodnotený ako priemerný mesiac. V rámci jednotlivých povodí prevládali nadpriemerné a mierne nadpriemerné hladiny a výdatnosť prameňov v povodí Hrona, Popradu, Bodvy, Bodrogu, Hornádu, Moravy a Slanej. V povodí Váhu prevládali

Obrázok 8. Situačná mapa priestorového mesačného hodnotenia podzemnej vody na Slovensku; hodnotený mesiac október 2023.



Obrázok 9. Situačná mapa priestorového mesačného hodnotenia podzemnej vody na Slovensku; hydrologický rok 2023.

podpriemerné hladiny podzemnej vody a výdatnosti prameňov. V septembri bolo zaznamenaných vo viacerých regiónoch Slovenska niekoľko období bez výskytu zrážok. Zrážky sa koncentrovali iba do niektorých dní, a napriek tomu ich mesačné úhrny neboli až tak veľmi vzdialené od ich dlhodobých priemerných hodnôt (Bulletin SHMÚ, č. 9, 2023), to malo vplyv na vyhodnotenie mesiaca ako priemerného.

Posledný mesiac v hydrologickom roku 2023, **október**, bol celkovo hodnotený ako priemerný - mierne podpriemerný. V rámci jednotlivých povodí prevládali výrazne nižšie, teda nižšie ako je ich dlhodobý normál

referenčného obdobia 1981-2010, hladiny podzemnej vody a výdatnosti prameňov v povodí Ipľa, Hrona, Váhu a Bodrogu (Obr. 8). Dopĺňanie zásob podzemnej vody sa v prevažnej časti tohto mesiaca neprejavovalo.

Záver

Hydrologický rok 2023 celkovo hodnotíme ako priemerný s priaznivým dopĺňaním zásob podzemnej vody hlavne v zimnom období. Najlepšie hodnotenými mesiacmi z hľadiska dopĺňania zásob podzemnej vody a výskytu nadpriemerných hodnôt, či už hladiny podzemnej vody alebo

výdatnosti prameňov, boli mesiace január a február. Naopak, najhorším mesiacom s prevládajúcim výskytom hodnôt výrazne nižších ako je ich dlhodobý normál, bol november 2022. V tomto mesiaci ešte doznievala nepriaznivá situácia z predošlého hydrologického roka, ktorý bol vyhodnotený ako podpriemerný - suchý. Najväčší dopad sucha sa v rámci hydrologického roka 2023 prejavil v povodí Váhu, Bodrogu a v povodí Moravy.

Literatúra

Bulletin meteorológia a klimatológia Slovenská republika
č. 11 - č. 12, 2022, ročník 28, SHMÚ 2022.

Bulletin meteorológia a klimatológia Slovenská republika
č. 1 - č. 10, 2023, ročník 29, SHMÚ 2023.

SHMÚ, Aktuality: Hodnotenie hydrologickej situácie v mesiaci november – december 2022 a január – október 2023, <https://www.shmu.sk/sk/?page=2049>.

SHMÚ; Operatívne údaje pozorovacích objektov podzemnej vody a hodnotenie výskytu sucha, https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pzv_kvantita.

SHMÚ, Klimatológia, Mapové produkty: Úhrny atmosférických zrážok na Slovensku 11/2022 – 10/2023 v % normálu 1991 – 2020. <https://www.shmu.sk/sk/?page=1610>.

Valéria Slivová, Michaela Kurejová Stojkovová,
Zuzana Paľušová, SHMÚ, Bratislava

XXVII. SNEHÁRSKE STRETNUTIE V JESENÍKOCH

14. – 16. februára 2024 sa v pohorí Hrubý Jeseník v Českej republike uskutočnilo XXVII. Snehárske stretnutie, ktoré tento rok organizovali pracovníci ostravského ČHMÚ spolu s Oddelením aplikovanej hydrológie ČHMÚ.

Po príchode účastníkov z Čiech aj zo Slovenska odznela prvá časť príspevkov zameraných prevažne na dlhodobé klimatologické pozorovanie snehu, zrážok a teploty vzduchu, ale hovorilo sa aj o pozorovaniach v teréne,

nových automatických metódach a meracích prístrojoch na stanicích. Prezentujúci boli okrem ČHMÚ a SHMÚ aj z Ústavu hydrológie SAV v.v.i. (ÚH SAV) a UMB. V príjemnej neformálnej atmosfére odzneli príspevky, ktoré hodnotili poslednú zimnú sezónu, či prezentovali dlhodobé trendy snehovej pokrývky v horskom prostredí. Zaujímavá bola aj prezentácia o tragickej lavíne v Trangošskej doline v Nízkych Tatrách, ktorá sa stala v roku 1935 a dodnes je spätá s viacerými záhadnými otázkami. Náš príspevok bol o snehových pomeroch v povodí Tajovského potoka v Kremnických vrchoch počas zimy 2023/2024. Pomery sme vyhodnocovali využitím dát zo staníc SHMÚ, z modelov NASA, z terénnych pozorovaní a z indexov vypočítaných zo satelitných snímok Sentinel. Pripravili sme ho v spolupráci s Martinom Halajom z Odboru hydrologickej monitorovania, predpovede a výstrahy SHMÚ v Banskej Bystrici.

Všetci prítomní sa zhodli, že na väčšine územia Čiech aj Slovenska, okrem vysokých pohorí, snehu ubúda a najvýraznejšie sa to prejavuje najmä v poslednej dekáde. Teplota vzduchu aj zrážky boli počas decembra 2023 a januára 2024 vysoko nad dlhodobým normálom, padali aj teplotné rekordy. Za posledných 10 rokov bolo 8 celkovo najteplejších a tohtoročná zima bola mimoriadne teplá. Otepľovanie zaznamenané na meteorologických stanicích podľa odborníkov naberá na sile a je dokonca výraznejšie, ako predpokladali pesimistické scenáre. Najvýraznejšie oteplenie sa vyskytlo na Vianoce a rýchle topenie snehu spojené s výdatnými tekutými zrážkami vyústilo do nárastu hladín vodných tokov koncom decembra a začiatkom januára. Vysoké vodné stavy pretrvávali aj počas februára, čo je pre toto obdobie veľmi nezvyčajné.

Druhý deň sme sa vydali za snehom na hlavný hrebeň pohoria Hrubý Jeseník. Z Dolní Moravice sme sa vyviezli na Karlovu Studánku a odtiaľ na Ovčárnu a najvyšší vrchol pohoria Praděd (1491), kde nás čakala ešte 1,5 m hrubá snehová pokrývka. Pracovníci Horskéj služby zo stanice Ovčárna nám pripravili zaujímavý program. Kopali sme snehový profil, ktorý sme následne analyzovali a testovali z hľadiska stability. Táto činnosť sa bežne vykonáva najmä



za účelom lavínovej prevencie. V jednotlivých vrstvách profilu sa merala teplota a tvrdosť snehu, pozorovali sa snehové zrná a nakoniec sa robil test stability. V druhej časti sme sa rozprávali o vyhľadávaní ľudí zasypaných v lavíne pomocou systémov PEEPs a vo vyznačenom tréningovom poli sme si cvične skúšali nasondovať zasypané „obete“. Bolo to veľmi zaujímavé a pre niektorých z nás to bola vôbec prvá skúsenosť s tréningovým sondovaním v lavíne. Aj keď lavíny v Hrubom Jeseníku nepadajú tak často ako v iných, vyšších pohoriach, existujú tu rizikové lokality, ktorým je lepšie sa vyhnúť. Následne sme sa po skupinách vybrali na lyžiach alebo pešo urobiť verifikačné expedičné merania výšky snehovej pokrývky a vodnej hodnoty snehu na vopred určené lokality (Červená hora, Keprník, Vysoká hole, Jelení studánka a Praděd). Po návrate večer odzneli ďalšie zaujímavé prednášky a spracované merania z terénu sme porovnali s výstupom z hydrologického modelu. Zostal čas aj na neformálne pracovné rozhovory.

Snehárske stretnutia sa uskutočňujú od r. 1996 a založil ich RNDr. Ladislav Holko, PhD. z ÚH SAV v.v.i. v Liptovskom Mikuláši. Prvé stretnutie sa konalo na Chate M. R. Štefánika pod Ďumbierom a aktuálne sa tieto stretnutia striedajú v Čechách a na Slovensku. Archív stretnutí aj s jednotlivými zborníkmi je možné nájsť na stránkach ÚH SAV v.v.i.

*Lenka Balážovičová
Univerzita Mateja Bela, Banská Bystrica*



POKYNY PRE AUTOROV

Meteorologický časopis akceptuje príspevky napísané v anglickom, slovenskom a českom jazyku. Príspevky napísané v slovenskom a českom jazyku musia byť zaslané spolu s anglickou verziou názvu, abstraktu a anglických popisiek k obrázkom a tabuľkám. Autori môžu zaslať svoj príspevok priamo šéfredaktorovi časopisu na adresu milan.onderka@shmu.sk alebo technickej redaktorky na adresu katarina.pukancikova@shmu.sk. Meteorologický časopis neposkytuje autorom službu jazykovej korekcie. Odporúčame všetkým autorom publikujúcim v anglickom jazyku, aby si nechali skontrolovať príspevok rodeným hovorcom. Zaslané príspevky nesmú byť už publikované iným vydavateľom a ani nesmú byť v recenznom konaní v inom časopise. Obrázky musia byť očíslované tak ako vystupujú v texte. Obrázky musia byť zaslané v jednom z nasledovných grafických formátov: TIFF, JPEG alebo EPS. Minimálne požadované rozlíšenie obrázkov je 350 dpi. Tabuľky musia byť v editovateľnej forme.

AUTHOR'S INSTRUCTIONS

Manuscripts must be written either in English (American or British usage is accepted, but not a mixture of both), Slovak and Czech. Manuscripts written in the Slovak and Czech languages must have the title, abstract and figure/table captures written also in English. Authors are requested to send their manuscripts to the Editor-in-Chief (milan.onderka@shmu.sk) or the Assistant Editor (katarina.pukancikova@shmu.sk). The journal does not provide language correction services. All manuscripts written in English should be checked by a native speaker prior to submission. Submitted manuscripts should not have been published previously elsewhere nor be under consideration for publication elsewhere. Illustrations must be numbered according to their sequence in the text. Electronic artwork (images) must be submitted in one of the following formats: TIFF, JPEG, or EPS, with a minimal resolution of 350 dpi. Tables must be submitted as editable text.

