



KONFERENCIA MLADÝCH ODBORNÍKOV

Zborník súťažných prác 2024

36. KONFERENCIA MLADÝCH HYDROLÓGOV

25. KONFERENCIA MLADÝCH METEOROLÓGOV, KLIMATOLÓGOV
A ODBORNÍKOV NA KVALITU OVZDUŠIA

23. KONFERENCIA MLADÝCH VODOHOSPODÁROV

**Beata Randusová
(Editor)**

Konferencia mladých odborníkov

14. november 2024



**Slovenský hydrometeorologický ústav
Bratislava 2024**

KONFERENCIA MLADÝCH ODBORNÍKOV

Zborník súťažných prác 2024

Všetky súťažné príspevky boli posúdené odbornými recenzentmi.

Odborní garanti:

RNDr. Paulína Valová pre meteorológiu, klimatológiu a kvalitu ovzdušia

RNDr. Pavol Miklánek, CSc. pre hydrológiu

Ing. Pavel Hucko, CSc. pre vodné hospodárstvo

Organizačný výbor konferencie:

Ing. Danica Lešková, PhD.

Mgr. Mária Derková, PhD.

RNDr. Pavol Miklánek, CSc.

Ing. Beata Randusová, PhD.

Ing. Valéria Wendlová

Odborní recenzenti:

Ing. Lotta Blaškovičová, PhD.

Doc. Ing. Michaela Danáčová, PhD.

Ing. Zuzana Danáčová, PhD.

Mgr. Mária Derková, PhD.

doc. RNDr. Martin Gera, PhD.

Ing. Dana Halmová, PhD.

Ing. Hana Hlaváčiková, PhD.

Mgr. Kateřina Hrušková, PhD.

Ing. Pavel Hucko, CSc.

Ing. Miroslava Kabátová

Ing. Eva Kolesárová

Ing. Ingrid Kušniráková

Mgr. Ondřej Ledvinka, PhD.

RNDr. Pavol Miklánek, CSc.

Ing. Martin Mišík, PhD.

Mgr. Milan Onderka, PhD.

RNDr. Norbert Polčák, PhD.

RNDr. Paulína Valová

Ing. Valéria Wendlová

Za jazykovú úpravu, obsah súťažných príspevkov a publikované výsledky zodpovedajú autori.

© Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava 2024

ISBN: 978-80-99929-79-2

EAN: 9788099929792

Citácie:

AUTOR. 2024. Názov článku. In: *Konferencia mladých odborníkov*. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, 2024. ISBN: 978-80-99929-79-2, s. XXX-XXX.

Názov: Konferencia mladých odborníkov

Editor: Ing. Beata Randusová, PhD.

Vydavateľ: Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava

Dátum publikovania: 14. november 2024

Počet strán: 165

Obsah

I. Sekcia mladých hydrológov	5
Monitoring kvality banských vôd v regióne Gelnica (Dominika Hadbavná)	6
Odhad indexu listovej plochy v rozpadajúcej smrečine Západných Tatier (Martin Jančo) .	16
Meteorological data analysis from a forestry perspective in the Sopron Botanical Garden's station in Hungary (Lili Muraközy)	27
Klasifikácia a geomorfologický efekt priestorovej distribúcie zvyškov dreva (LWD) v koryte na príklade vodného toku Belá (Samuel Radič)	38
Vliv evidovaného antropogenního ovlivnění na vodnost řeky Svratky ve stanici Židlochovice za referenční období 1990-2020 (Barbora Špínavá a Jiří Válek).....	49
II. Sekcia mladých vodohospodárov.....	56
Utilizing Open-Source R Programming for Data Visualization in Climate-Resilient Stormwater Management (Raghad Awad)	57
Vliv variantního uspořádání agrolesnických systémů na erozní poměry (Lukáš Buršík)....	68
Obmedzuje výskyt ťažkých kovov použitie vyčistenej odpadovej vody na závlahu, ak sa aplikuje kvartérne dočistenie? (Jakub Jurík a Ronald Zakhar).....	78
Stormwater adaptation measures: a case study in small suburban catchment (Kostiantyn Sokolchuk).....	85
Vplyv ozonizácie na ekotoxicku odpadových vôd s obsahom alkylfenolových zlúčenín (Nikola Šoltýsová a Ines Vavrová).....	95
III. Sekcia mladých meteorológov, klimatológov a odborníkov na kvalitu ovzdušia....	103
Tvorba mapových produktov vybraných klimatických scenárov na území Slovenska pre budúce normálové obdobia 2021-2050 a 2071-2100 (Marcel Garaj)	104
Vplyv meteorologického sucha na výnosy vybraných poľnohospodárskych plodín v rokoch 2000-2022 (Zuzana Jutková)	117
Satelitné merania slnečného žiarenia a ich využitie pri hodnotení účinnosti fotovoltických elektrární (Peter Kaňák)	128
Scenáre zmien meteorologického sucha na Slovensku (Jaroslava Slavková).....	142
Predpoveď sekvencie meteorologických prvkov neurónovými sieťami (Martin Vozár) ...	154

I. Sekcia mladých hydrológov

Monitoring kvality banských vôd v regióne Gelnica

Mgr. Dominika Hadbavná

Abstrakt

Táto práca skúma fyzikálno-chemické parametre banskej vody v banskej štôlni a ich vplyv na okolitý vodný tok. Merania prebiehali počas niekoľkých trojtýždňových intervalov, pričom sa sledovali parametre pH, vodivosť, teplota a rozpustnosť látok vo vode. Hodnoty pH sa pohybovali v rozmedzí 7,5 – 8,8, čo naznačuje mierne alkalické prostredie. Hodnoty vodivosti sa pohybovali od 0,35 do 0,55 mS/cm, čo naznačuje prítomnosť vápenatých a horečnatých solí, typických pre banské vody. Teplota vody bola relatívne stabilná, pričom najnižšia hodnota bola 7,2 °C a najvyššia 8,9 °C. Rozpustnosť látok vo vode ukázala mierne fluktuácie medzi 40 a 90 metrami, čo môže byť dôsledkom chemických procesov prebiehajúcich v rámci štôlne.

Po vyústení banskej vody do blízkeho potoka sa vodivosť zvýšila na 374 μ S/cm, pH kleslo na 8,26 a teplota stúpla na 8 °C, čo naznačuje zmiešanie minerálnych a environmentálnych zložiek. Zmeny týchto parametrov môžu dlhodobo ovplyvniť chemizmus potoka, jeho sedimentáciu a mobilitu rozpustených látok. Výsledky poukazujú na nutnosť monitorovať kvalitu vody, aby sa zabránilo možným negatívnym environmentálnym dopadom na vodné ekosystémy.

Kľúčové slová: kvalita vody, banské diela, hydrogeológia, pH, vodivosť

Abstract

This thesis examines the physicochemical parameters of mine water in a mining tunnel and their impact on the surrounding watercourse. Measurements were taken during several three-week intervals, monitoring parameters such as pH, conductivity, temperature, and the solubility of substances in the water. The pH values ranged from 7.5 to 8.8, indicating a slightly alkaline environment. The conductivity values ranged from 0.35 to 0.55 mS/cm, suggesting the presence of calcium and magnesium salts, typical for mine waters. The water temperature remained relatively stable, with the lowest value at 7.2°C and the highest at 8.9°C. The solubility of substances in the water showed slight fluctuations between 40 and 90 meters, which could be a result of chemical processes occurring within the tunnel.

Upon the discharge of the mine water into the nearby stream, the conductivity increased to 374 μ S/cm, pH dropped to 8.26, and temperature rose to 8°C, indicating a mixing of mineral and environmental components. Changes in these parameters may have long-term effects on the stream's chemistry, sedimentation, and the mobility of dissolved substances. The results highlight the need to monitor water quality to prevent potential negative environmental impacts on aquatic ecosystems.

Keywords: water quality, mining works, hydrogeology, pH, conductivity

Anotácia

Práca sa zameriava na hydrogeochemický monitoring kvality vody v štôlni Jozef, nachádzajúcej sa v oblasti Gelnice v Slovenskom rudohorí. Merané parametre zahŕňajú teplotu vody, pH, elektrolytickú vodivosť a rozpustnosť látok vo vode. Cieľom výskumu je analyzovať vplyv geologického zloženia a historických ťažobných aktivít na chemické a fyzikálne vlastnosti podzemnej vody v štôlni. Výsledky poskytujú detailný pohľad na hydrologické a geochemické procesy prebiehajúce v banskej štruktúre a hodnotia potenciálne environmentálne riziká spojené s kontamináciou kovmi a ďalšími látkami.

Annotation

The work focuses on the hydrogeochemical monitoring of water quality in the Jozef mine tunnel, located in the Gelnica region of the Slovak Ore Mountains. The parameters measured include water temperature, pH, electrolytic conductivity, and the solubility of substances in water. The aim of the research is to analyze the influence of geological composition and historical mining activities on the chemical and physical properties of groundwater within the tunnel. The results provide a comprehensive understanding of the hydrological and geochemical processes occurring in the mining structure and evaluate the potential environmental risks related to contamination by metals and other substances.

Úvod

Opustené banské diela predstavujú špecifické hydrologické prostredie, v ktorom kvalita vody úzko súvisí s geologickými charakteristikami územia a dôsledkami historických ťažobných aktivít. V banskom regióne Gelnice, nachádzajúcom sa v Slovenskom rudohorí, dominuje gelnická sekvencia flyšového typu, ktorá je tvorená sericitickými fylitmi, pieskovecami, kremencami a vápencami. Tieto horninové jednotky majú významný vplyv na chemické vlastnosti podzemných vôd, ktoré nimi pretekajú, najmä v podmienkach opustených banských diel (Michaeli, Ištók, 2012). Geochemické procesy prebiehajúce v týchto horninách môžu viesť k rozpúšťaniu minerálnych látok, čím dochádza k zmene chemického zloženia vody.

História ťažby v Gelnici sa zameriavala predovšetkým na meď a železnú rudu, pričom vedľajším produktom ťažby boli zlato, striebro a ortuť (Klingová, Kling, 2012). Tieto ťažobné aktivity spolu s regionálnou geologickou skladbou prispievajú k vzniku znečisťujúcich látok v banskom prostredí, ktoré sa následne môžu uvoľňovať do podzemných vôd. Kontaminácia kovmi, ako aj inými anorganickými látkami, predstavuje potenciálne environmentálne riziko a zdôrazňuje potrebu systematického monitorovania kvality vôd v týchto oblastiach.

Významné geologické štúdie v oblasti Gelnice realizovali Papp (1919), ktorý skúmal rudy, a Kettner (1921), ktorý mapoval ílovité bridlice v okolí rieky Hnilec a Smolníckeho potoka. Tieto štúdie poskytli kľúčové informácie o regionálnej geológii a horninových formáciách, ktoré sú relevantné z hľadiska hydrogeologických pomerov a prúdenia podzemných vôd.

Hydrogeologický prieskum štôlne Jozef, vykonaný v roku 1953, priniesol dôležité údaje o prietoku a kvalite vody. Prietok vody sa pohyboval od $600 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ pri závale a postupne klesal na $400 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, pričom teplota vody bola stabilná ($8,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), v súlade s teplotou vonkajších vôd. Voda bola klasifikovaná ako sladká, mäkká a číra, bez prítomnosti usadenín, čo poukazuje na nízku koncentráciu suspendovaných látok (Dobiáš, 1953). Nadložie štôlne bolo tvorené kompaktnými horninami, ktoré vyplňali tektonické poruchy, avšak v dôsledku pohybův v zemskej kôre došlo k vzniku prasklín, ktoré umožňovali infiltráciu a prietok podzemnej vody. Štôlna Jozef slúžila ako odvodňovací systém, čím významne ovplyvňovala lokálne hydrologické podmienky. Tieto tektonické a hydrogeologické faktory

predstavujú dôležité premenné pri hodnotení kvality vody v opustených banských dielach, kde môžu dochádzať k nepredvídateľným zmenám v chemickom a fyzikálnom zložení vody.

Systematické sledovanie kvality vody v týchto podmienkach je kľúčové pre identifikáciu potenciálnych environmentálnych rizík, najmä vzhľadom na možnú kontamináciu kovmi a ďalšími látkami, ktoré môžu mať negatívny vplyv na okolité ekosystémy a zásoby podzemných vôd.

Metodika práce

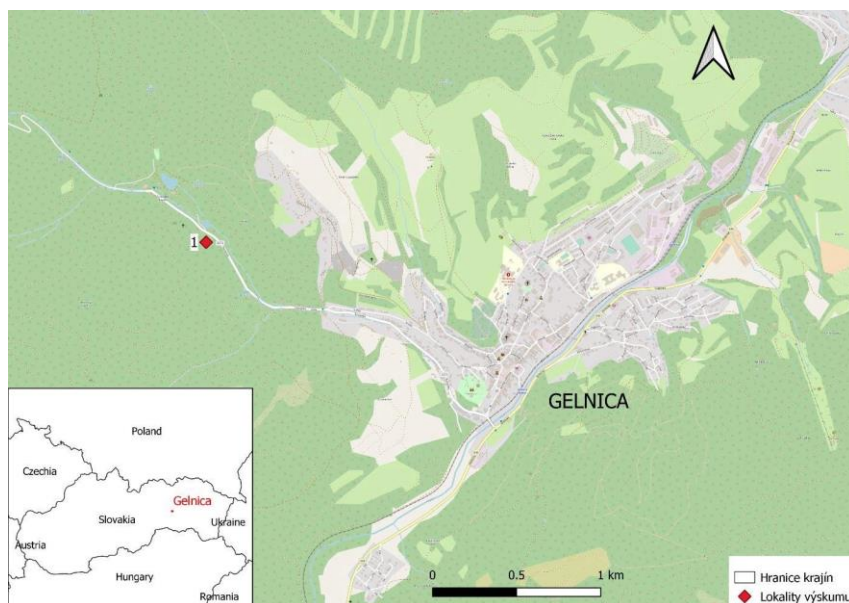
Štôlna Jozef ; GPS: 48.8583, 20.9095; 460 m. n.m.

Štôlna Jozef sa nachádza oproti malému Turzovskému jazeru, pri Turzovskom potoku v Turzovskej doline v Gelnici (Obrázok 1 a 2).

Všetky merania sme vykonávali v profiloch vzdialených od seba 10 m od ústia šachty smerom dovnútra. Rozostupy medzi profilmi boli merané pomocou meracieho pásma *Komelon NEO330 FIEBERGLAS TAPE*. Odmerané údaje boli v teréne zaznamenávané do terénneho protokolu alebo pomocou diktafónu a neskôr prepisované do tabuliek.

Teplotu a pH vody meriame sondou *Milwaukee pH 55* (rozsah merania pH -2,0 až 16,0 s presnosťou $\pm 0,1$, pH odchýlka: $\pm 0,1$, rozsah teploty 0,00 až 60,00 °C s presnosťou $\pm 0,5$ °C; teplota odchýlka $\pm 0,3$ °C). Vodivosť vody meriame sondou *Milwaukee EC 60* (meranie vodivosti s rozsahom 20 mS.cm⁻¹, TDS rozsah: 10,00 ppt; rozlíšenie vodivosti: 0,01 mS.cm⁻¹, TDS rozlíšenie: 0,01 ppt, EC presnosť: 2% plného rozsahu, TDS presnosť: 2% plného rozsahu).

Analýza prebehne s použitím programu Past (Hammer a Harper, 2006; verzia 4.05).



Obrázok 1. Mapa s vyznačením skúmanej lokality

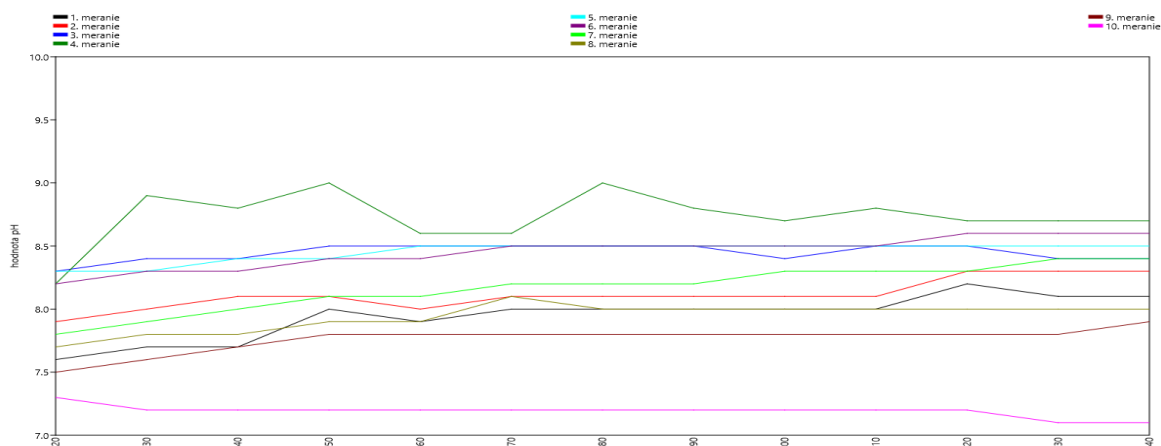


Obrázok 2. Vstupný portál štôlne Jozef

Výsledky

Tabuľka 1: hodnoty pH

vzdialenosť	1. meranie	2. meranie	3. meranie	4. meranie	5. meranie	6. meranie	7. meranie	8. meranie	9. meranie	10. meranie
vchod	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	7,6	7,9	8,3	8,2	8,3	8,2	7,8	7,7	7,5	7,3
30	7,7	8	8,4	8,9	8,3	8,3	7,9	7,8	7,6	7,2
40	7,7	8,1	8,4	8,8	8,4	8,3	8	7,8	7,7	7,2
50	8	8,1	8,5	9	8,4	8,4	8,1	7,9	7,8	7,2
60	7,9	8	8,5	8,6	8,5	8,4	8,1	7,9	7,8	7,2
70	8	8,1	8,5	8,6	8,5	8,5	8,2	8,1	7,8	7,2
80	8	8,1	8,5	9	8,5	8,5	8,2	8	7,8	7,2
90	8	8,1	8,5	8,8	8,5	8,5	8,2	8	7,8	7,2
100	8	8,1	8,4	8,7	8,5	8,5	8,3	8	7,8	7,2
110	8	8,1	8,5	8,8	8,5	8,5	8,3	8	7,8	7,2
120	8,2	8,3	8,5	8,7	8,5	8,6	8,3	8	7,8	7,2
130	8,1	8,3	8,4	9,1	8,5	8,6	8,4	9,1	7,8	7,1
140	8,1	8,3	8,4	8,7	8,5	8,6	8,4	8	7,9	7,1



Obrázok 3: hodnoty pH

pH hodnota sa pohybuje v rozmedzí od približne 7,0 do 9,5, pričom väčšina hodnôt sa nachádza medzi 7,5 a 9,0. Tieto hodnoty naznačujú, že voda v banskej štolni je mierne zásaditá, pričom žiadne meranie nespadlo pod hodnotu 7,0 (neutrálnu hodnotu).

Niektoré merania ukazujú kolísania, ktoré môžu súvisieť s meniacimi sa podmienkami v banskej štolni, napríklad sezónne zmeny, prítoky alebo iné geochemické faktory.

Celkovo sa pH vody v banskej štolni zdá byť relatívne stabilné, s malými výkyvmi. Väčší pokles zaznamenaný v poslednom, 10. meraní, môže naznačovať výraznú zmenu podmienok, pravdepodobne spôsobenú výdatnými zrážkami. Takéto zrážky môžu ovplyvniť hydrologické podmienky tým, že zavádzajú do systému nové vody s odlišnou chemickou charakteristikou, čo môže dočasne znížiť pH, najmä ak dažďová voda zreaguje s minerálmi alebo ak naruší usadeniny vo vode.

Dodatočné merania pH na rôznych hĺbkach v banskej štolni ukazujú hodnoty:

- v 20. metri: pH 8,39
- v 90. metri: pH 8,40
- v 140. metri: pH 8,27

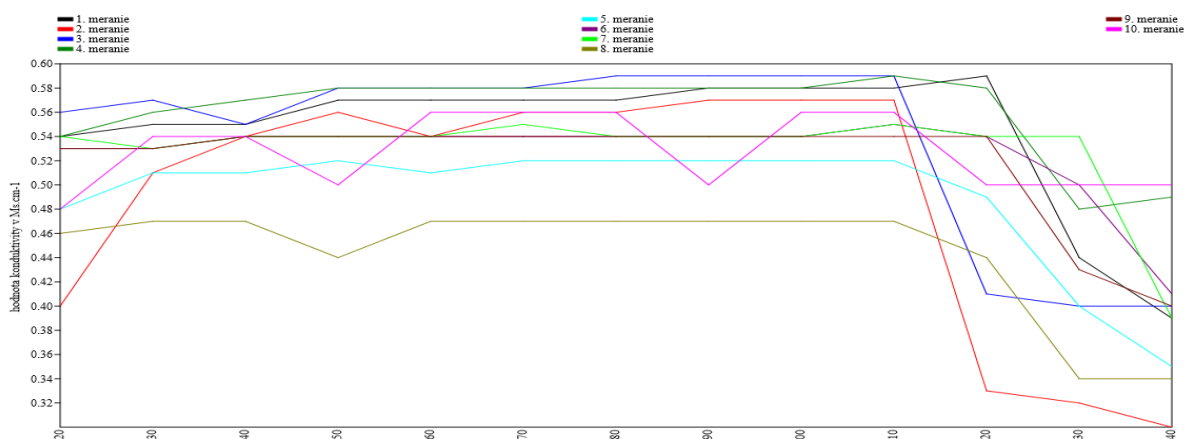
Tieto výsledky naznačujú, že pH vody zostáva relatívne stabilné v celom profile štolne, s len minimálnymi rozdielmi medzi jednotlivými meraniami. Mierny pokles pH na väčšej hĺbke (8,27 v 140. metri) môže naznačovať rozdiely v chemickom zložení vody alebo vplyv rôznych minerálnych vrstiev, cez ktoré voda prechádza. Tieto hodnoty sú však stále v rozsahu mierne zásaditých hodnôt.

Podobné zmeny sú často spomínané v štúdiách o vodách v banských systémoch, kde výdatné zrážky môžu priniesť zvýšené znečistenie alebo zvýšenú kyslosť vody, najmä v dôsledku zvýšenej oxidácie minerálov, ako je pyrit. Tieto procesy sú bežne spojené s výkyvmi pH počas daždivých období (Industry.Gov., 2016).

Zmeny v pH, aj keď v úzkom rozmedzí, môžu byť dôsledkom viacerých hydrogeochemických procesov, ako je oxidácia sulfidových minerálov (napríklad pyritu) alebo interakcia vody s horninami (Nordstrom, 2011).

Tabuľka 2: hodnoty vodivosti v μS

vzdialenosť	1. meranie	2. meranie	3. meranie	4. meranie	5. meranie	6. meranie	7. meranie	8. meranie	9. meranie	10. meranie
vchod	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0,54	0,4	0,56	0,54	0,48	0,53	0,54	0,46	0,53	0,48
30	0,55	0,51	0,57	0,56	0,51	0,53	0,53	0,47	0,53	0,54
40	0,55	0,54	0,55	0,57	0,51	0,54	0,54	0,47	0,54	0,54
50	0,57	0,56	0,58	0,58	0,52	0,54	0,54	0,44	0,54	0,5
60	0,57	0,54	0,58	0,58	0,51	0,54	0,54	0,47	0,54	0,56
70	0,57	0,56	0,58	0,58	0,52	0,54	0,55	0,47	0,54	0,56
80	0,57	0,56	0,59	0,58	0,52	0,54	0,54	0,47	0,54	0,56
90	0,58	0,57	0,59	0,58	0,52	0,54	0,54	0,47	0,54	0,5
100	0,58	0,57	0,59	0,58	0,52	0,54	0,54	0,47	0,54	0,56
110	0,58	0,57	0,59	0,59	0,52	0,55	0,55	0,47	0,54	0,56
120	0,59	0,33	0,41	0,58	0,49	0,54	0,54	0,44	0,54	0,5
130	0,44	0,32	0,4	0,48	0,4	0,5	0,54	0,34	0,43	0,5
140	0,39	0,3	0,4	0,49	0,35	0,41	0,39	0,34	0,4	0,5

Obrázok 4: hodnoty vodivosti v μS

Vodivosť je dôležitým ukazovateľom celkovej mineralizácie vody, pretože meria schopnosť vody viesť elektrický prúd, čo súvisí s prítomnosťou rozpustených solí a iných iónov.

Namerané hodnoty vodivosti sa pohybujú v rozmedzí od približne 0,35 mS/cm do 0,55 mS/cm. Väčšina meraní sa nachádza okolo 0,5 mS/cm, čo naznačuje mierne mineralizovanú vodu, charakteristickú pre banské vody.

Zreteľné sú najmä dva výrazné poklesy v záverečnej fáze meraní, čo môže byť spôsobené prítokom podzemnej vody alebo iných zdrojov s nižšou mineralizáciou.

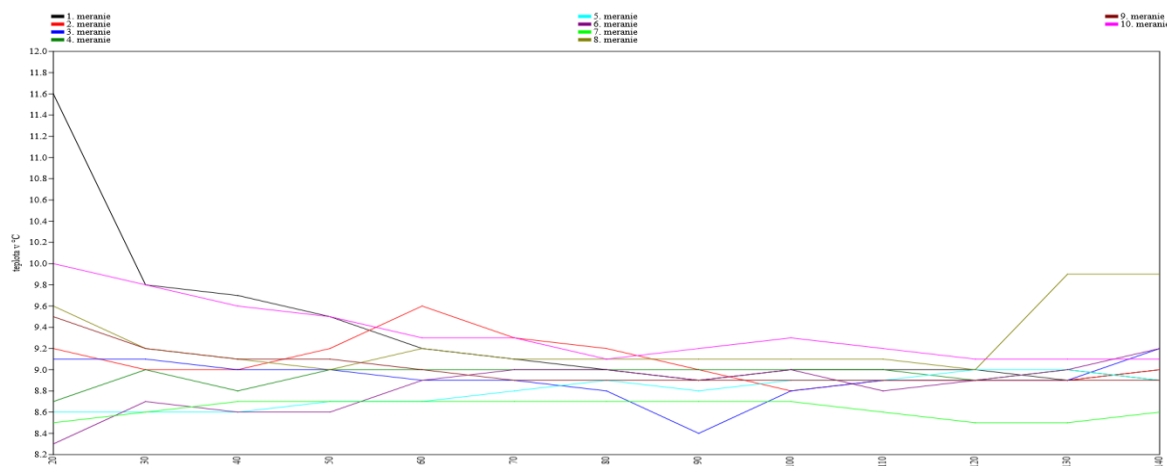
Stabilné hodnoty vodivosti s občasnými výkyvmi sú typické pre banské vody, kde prebiehajú rôzne geochemické procesy, ako sú oxidácia minerálov, uvoľňovanie iónov a prúdenie vody cez rozličné vrstvy hornín.

Podobný výskum bol publikovaný v článkoch, ktoré skúmajú chemické zmeny vo vodách ovplyvnených banskými činnosťami. Napríklad výskum USGS ukazuje, že vodivosť môže kolísať v závislosti od koncentrácie iónov v banských vodách, pričom sa sleduje jej vzťah k hydrogeochemickým procesom (Younger, 2002).

Výskumy týkajúce sa banských vôd často potvrdzujú, že vplyv rôznych procesov, ako je oxidácia pyritu a iných minerálov, môže zvýšiť vodivosť, zatiaľ čo prítok vody s nižším obsahom iónov ju môže znížiť (Nordstorm, 2000).

tabuľka 3: teplota vody v °C

vzdialenosť	1. meranie	2. meranie	3. meranie	4. meranie	5. meranie	6. meranie	7. meranie	8. meranie	9. meranie	10. meranie
vchod	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	11,6	9,2	9,1	8,7	8,6	8,3	8,5	9,6	9,5	10
30	9,8	9	9,1	9	8,6	8,7	8,6	9,2	9,2	9,8
40	9,7	9	9	8,8	8,6	8,6	8,7	9,1	9,1	9,6
50	9,5	9,2	9	9	8,7	8,6	8,7	9	9,1	9,5
60	9,2	9,6	8,9	9	8,7	8,9	8,7	9,2	9	9,3
70	9,1	9,3	8,9	9	8,8	9	8,7	9,1	8,9	9,3
80	9	9,2	8,8	9	8,9	9	8,7	9,1	8,9	9,1
90	8,9	9	8,4	9	8,8	8,9	8,7	9,1	8,9	9,2
100	9	8,8	8,8	9	8,9	9	8,7	9,1	8,9	9,3
110	9	8,9	8,9	9	8,9	8,8	8,6	9,1	8,9	9,2
120	9	8,9	8,9	8,9	9	8,9	8,5	9	8,9	9,1
130	8,9	8,9	8,9	9	9	9	8,5	9,9	8,9	9,1
140	9	9	9,2	8,9	8,9	9,2	8,6	9,9	8,9	9,1



Obrázok 5: teplota vody v °C

V úvode prvých meraní vidíme pokles teploty zo septembra do októbra. Toto je pravdepodobne spôsobené sezónnymi zmenami, keď sa povrchové teploty začínajú ochladzovať, čo môže ovplyvniť aj teplotu podzemných vôd. Po počiatočných sezónnych výkyvoch v blízkosti vstupného portálu sa teplota stabilizovala na úrovni okolo 9 °C až 10 °C, čo je pomerne typické pre podzemné vody.

V doplnenom kontrolnom meraní boli zaznamenané nasledujúce hodnoty teploty banskej vody:

- V 20. metroch: 8,8 °C
- V 90. metroch: 8,8 °C

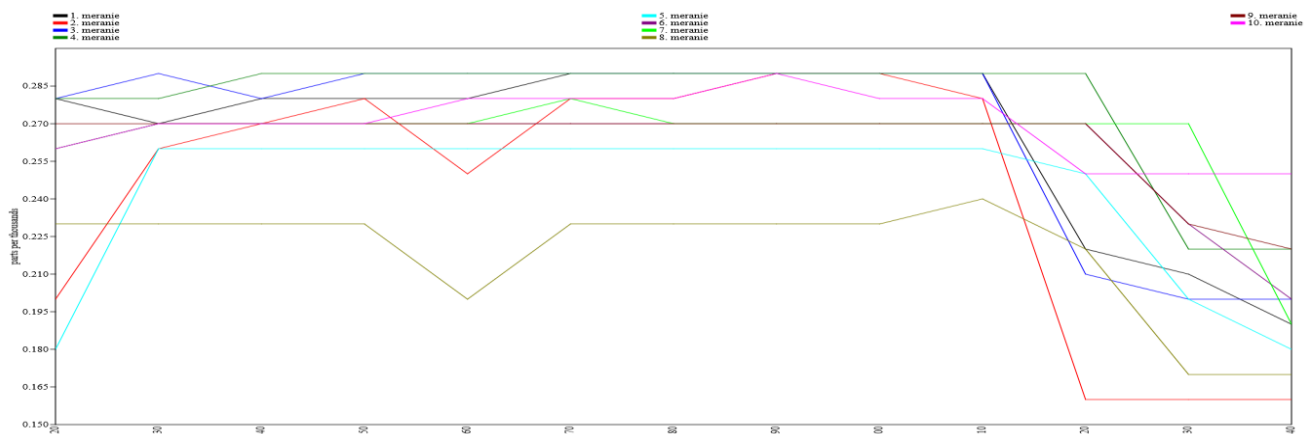
• **V 140. metroch:** 8,9 °C

Podzemné priestory sú menej ovplyvnené dennými a sezónnymi výkyvmi teploty, pretože teplota hornín a podlažia je stabilná. Horniny okolo banských chodieb pôsobia ako izolant a udržiavajú konštantnú teplotu (Linklater, 2020).

Podľa výskumov podzemné vody v banských systémoch majú tendenciu reagovať na sezónne zmeny s určitou zotrvačnosťou. Tento proces je pomalší ako pri povrchových vodách, ale sezónne ochladenie na povrchu môže viesť k postupnému poklesu teploty v podzemných priestoroch (Younger, 2002).

Tabuľka 3: rozpustnosť látok

vzdialenosť	1. meranie	2. meranie	3. meranie	4. meranie	5. meranie	6. meranie	7. meranie	8. meranie	9. meranie	10. meranie
vchod	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0,28	0,2	0,28	0,28	0,18	0,26	0,26	0,23	0,27	0,26
30	0,27	0,26	0,29	0,28	0,26	0,27	0,27	0,23	0,27	0,27
40	0,28	0,27	0,28	0,29	0,26	0,27	0,27	0,23	0,27	0,27
50	0,28	0,28	0,29	0,29	0,26	0,27	0,27	0,23	0,27	0,27
60	0,28	0,25	0,29	0,29	0,26	0,27	0,27	0,2	0,27	0,28
70	0,29	0,28	0,29	0,29	0,26	0,27	0,28	0,23	0,27	0,28
80	0,29	0,28	0,29	0,29	0,26	0,27	0,27	0,23	0,27	0,28
90	0,29	0,29	0,29	0,29	0,26	0,27	0,27	0,23	0,27	0,29
100	0,29	0,29	0,29	0,29	0,26	0,27	0,27	0,23	0,27	0,28
110	0,29	0,28	0,29	0,29	0,26	0,27	0,27	0,24	0,27	0,28
120	0,22	0,16	0,21	0,29	0,25	0,27	0,27	0,22	0,27	0,25
130	0,21	0,16	0,2	0,22	0,2	0,23	0,27	0,17	0,23	0,25
140	0,19	0,16	0,2	0,22	0,18	0,2	0,19	0,17	0,22	0,25



Obrázok 6: rozpustnosť látok

Rozpustnosť látok vo vode sa pohybuje v rozmedzí od približne 0,19 ppt do 0,235 ppt. Väčšina meraní osciluje okolo hodnoty 0,22 až 0,23 ppt, čo indikuje relatívne stabilnú koncentráciu rozpustených látok počas väčšiny meraní.

V poslednej časti grafu (po približne 110 metroch) dochádza k prudkému poklesu koncentrácií rozpustených látok. Tento trend je zjavný v takmer všetkých meraniach. Pokles môže byť spôsobený čerstvým prítokom vody s nižšou koncentráciou rozpustených látok, ktorý znižuje celkovú koncentráciu látok v tejto časti.

Takéto poklesy môžu súvisieť so zmenami v hydrologických podmienkach, napríklad po daždi, keď je do štôlne privedená voda s nižšou koncentráciou minerálov (Whaley, 2023).

Medzi 40 a 90 metrami vidíme mierne fluktuácie vo viacerých meraniach, čo môže byť dôsledkom rôznych chemických reakcií, ktoré prebiehajú v rámci banského prostredia.

Tieto fluktuácie môžu byť ovplyvnené rôznymi faktormi, vrátane prítomnosti oxidujúcich minerálov alebo mikrobiálnej aktivity, ktorá môže ovplyvniť rozpustnosť látok vo vode. V banskej vode sa prítomnosť vápnika (Ca) a horčíka (Mg) často vyskytuje ako súčasť procesov spojených s oxidáciou minerálov a rozpúšťaním hornín. Tieto prvky sú bežné v krasových oblastiach alebo v prostredí, kde sa horniny ako vápenec (CaCO_3) a dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) rozkladajú v dôsledku chemických reakcií. Vápnik a horčík sa uvoľňujú do vody, čo zvyšuje jej mineralizáciu. Podobné situácie sa často vyskytujú aj v súvislosti s problémami spojenými s odvodňovaním baní, kde môže v dôsledku týchto procesov dochádzať k tvorbe tvrdých vôd s vyšším obsahom minerálov (Linklater, 2020).

Keď banská voda ústi do potoka, môže to viesť k významným zmenám v chemickom zložení potoka, čo následne môže ovplyvniť jeho hydrochemické vlastnosti a dlhodobú kvalitu vody. Vzhľadom na zvýšenú vodivosť, zmeny v pH a teplote po vyústení banskej vody dochádza k obohateniu vody o rozpustné minerály, predovšetkým vápnik a horčík, čo zvyšuje mineralizáciu potoka.

- Pred vyústením:

Vodivosť: 206 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Teplota vody: 7,2 °C

pH: 8,33

- Po vyústení:

Vodivosť: 374 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Teplota vody: 8 °C

pH: 8,26

Záver

Na základe vykonaných meraní a analýz fyzikálno-chemických parametrov banskej vody sme zistili, že banská voda vykazuje stabilné hodnoty pH v rozmedzí mierne alkalického prostredia (7,5 – 8,8), pričom vodivosť sa pohybuje v rozmedzí 0,35 – 0,55 $\mu\text{S/cm}$. Tieto údaje naznačujú prítomnosť mierne mineralizovanej vody s vyšším obsahom rozpustených minerálov, najmä iónov vápnika a horčíka, čo je typické pre banské vody. Taktiež teplotné merania preukázali stabilnú teplotu banskej vody (7,2 °C – 8,9 °C).

Pri vyústení banskej vody do potoka boli zaznamenané zmeny, ktoré ovplyvnili hydrochemické vlastnosti vodného toku. Vodivosť po zmiešaní s banskými vodami vzrástla na 374 $\mu\text{S/cm}$, čo naznačuje zvýšenú mineralizáciu, a zároveň došlo k miernemu poklesu pH a miernemu zvýšeniu teploty vody. Tieto zmeny poukazujú na prítomnosť geochemických procesov, ktoré môžu mať dlhodobý vplyv na kvalitu vody v potoku. Zmena chemizmu vody môže ovplyvniť sedimentáciu, mobilitu ťažkých kovov a celkový chemizmus potoka, čo môže mať dlhodobý vplyv na geologické a hydrologické podmienky v oblasti.

Aj keď namerané hodnoty nenaznačujú akútne riziko kontaminácie, dlhodobé vplyvy zvýšenej mineralizácie a zmeny chemického zloženia vody môžu viesť k ekologickým a hydrologickým zmenám. Preto je dôležité pokračovať v monitorovaní banskej vody a jej vplyvu na vodný tok, aby sa predišlo potenciálnym environmentálnym problémom, ako je hromadenie minerálov v sedimentoch alebo zmena biologickej rovnováhy v potoku.

Tento výskum poukazuje na to, že aj drobné zmeny v chemickom zložení vody môžu časom viesť k významným úpravám hydrologických a geochemických podmienok, čím sa stáva nevyhnutné priebežné monitorovanie a kontrola týchto procesov.

Zdroje

Dobiáš, J. (1953). *Gelnica – štola Josef*. Hydrogeologie. Zpráva geologického průzkumu, 9.

HADBAVNÁ, D. (2021). *Opustené bane ako umelé podzemné ekosystémy – prípadová štúdia v systéme starých banských diel v Turzove*. Bakalárska práca. Prešovská univerzita v Prešove.

Kling, P., & Klingová, A. (2012). *Technické pamiatky spojené s banskou a hutníckou činnosťou na Spiši*. Spišská Nová Ves. ISBN 978-80-971197-8-2.

Linklater, C. (2020). *Acid mine drainage in the mining industry: A brief review*. UQx SMIX025N_7300. University of Queensland. https://edge.edx.org/asset-v1:UQx+SMIX025N_7300+2023_T2+type@asset+block/AMD2020_Claire_Linklater.pdf

Nordstrom, D. K. (2011). Mine waters: Acidic to circumneutral. *Elements*, 7(6), 393–398. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.393>

Nordstrom, D. K., et al. (2000). Geochemistry of acid mine waters. *Environmental Geochemistry*, 5, 133–160.

Younger, P. L. (2002). Mine water hydrogeology and geochemistry. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 17–32. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0179-6>

Whaley-Martin, K., et al. (2023). pH and thiosulfate dependent microbial sulfur oxidation strategies across diverse environments. *Frontiers in Microbiology*.

Odhad indexu listovej plochy v rozpadajúcej smrečine Západných Tatier

Martin Jančo

Ústav hydrológie Slovenskej akadémie vied, v.v.i., Výskumná základňa pre horskú hydrológiu,
Ondrašovská 16, 03105 Liptovský Mikuláš, Slovensko

Anotácia

Cieľom príspevku bolo zistiť hodnoty efektívneho indexu listovej plochy dospelého smrekového živého porastu a indexu drevnej plochy mŕtveho porastu a taktiež zistiť hodnoty indexu listovej plochy podrastu v živom a v mŕtvom smrekovom poraste a na voľnej ploche.

Kľúčové slová: efektívny index listovej plochy, index drevnej plochy, dospelý smrekový porast, voľná plocha, Západné Tatry

Annotation

The aim of this study was to estimate the effective leaf area index and woody area index of canopy layer and leaf area index understorey vegetation at mature living and dead spruce stands. The understorey leaf area index was estimated also for the open area.

Key words: effective leaf area, woody area index, mature spruce stand, open area, Western Tatras

Abstract

In the last decade we have been witnesses of spruce forest dieback in Central Europe. The main causes are wind calamities, hot summer weather and bark beetle infestation (*Ips typographus*). Mountain boreal spruce forests in Slovakia undergo the dieback as well. Forest changes influence the hydrological cycle, but estimating their impact at the catchment scale is only possible using modeling. Therefore, it is necessary to express these changes by changes in the parameters of hydrological models, which represent the influence of vegetation on the hydrological cycle. One such parameter of hydrological models is the leaf area index, which is used in the rainfall interception calculation. Estimation of effective leaf area index, woody area index and leaf area index in the understorey were realized in the living and dead Norway spruce (*Picea abies*) forest stands on the Červenec study site. The site is located at the forest line at an altitude 1,420 m a.s.l in Western Tatra Mts. Forest dieback on this research plot started in summer 2012 as a result of the bark beetle infestation (*Ips typographus*) and windfall in 2014 and since this moment, the dieback at this locality has been progressing. The canopy layer of effective leaf area index and woody area index were determined by the hemispherical photography. The understorey leaf area index estimation at the living and dead forest stands and in an open area was carried out using the SunScan instrument. These measurements at all stands were carried out during the growing season 2023 on June 16, August 8 and October 19. The effective leaf area index and woody area index of the canopy layer of living and dead stand remained stable during the growing season. The leaf area index in the understorey vegetation in the dead forest exhibited a substantial seasonal variability during the growing season (May-October) due to the development of

the phenophases of the individual observed species. The maximum was observed in August, the minimum in October. The differences in leaf area index between the forest canopy and understorey vegetation should be taken into account in the evaluation of the effects of forest changes on the water balance.

Úvod

Index listovej plochy (LAI – leaf area index) je pomer celkového vrchného povrchu listovej plochy ku ploche zemského povrchu, na ktorej vegetácia rastie (Chen, Black, 1992; Fasschnat, et al. 1994). Index listovej plochy je bezrozmerná veličina, aj keď sa niekedy uvádza v jednotkách $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ (Rich, et al. 1995; Schurlock, et al. 2001). V lesníctve je index listovej plochy často definovaný ako povrch jednej strany zelených listov na jednotku plochy pre listnaté porasty. Pre ihličnaté porasty je stanovenie indexu listovej plochy zložitejšie, pričom sa používajú tieto tri nasledovné definície: a.) celkový povrch ihlíc na jednotku plochy, b.) celkový povrch ihlíc na jednotku plochy delený dvoma, c.) premietnutá plocha ihlíc na jednotku plochy (Pavlendová, 2010; Pokorný, 2015). Dlhodobé monitorovanie indexu listovej plochy môže poskytnúť pochopenie dynamických zmien v produktivite a klimatických dopadoch na lesné ekosystémy. Okrem toho môže LAI slúžiť ako indikátor stresu v lesoch, teda môže byť použitý na skúmanie vzťahov medzi environmentálnymi stresovými faktormi a poškodením lesným hmyzom (Zheng, Moskal, 2009).

Viaceré zahraničné štúdie uvádzajú, že metódy hodnotenia indexu listovej plochy je možné rozdeliť na metódy priame a metódy nepriame (Chason, et al. 1991; Fasschnat, et al. 1994; Dufrêne, Bréda, 1995; Chen, Black, 1997b). Priame metódy vyhodnotenia indexu listovej plochy vychádzajú zo zberu listov zo stromov a následného výpočtu ich plochy. Priame metódy sa ďalej delia na zberové a nezberové (Jonckheere, et al. 2004). Zberová metóda je metódou deštruktívnou a spočíva v odstránení všetkého listia z vegetácie a vyhodnotenia plochy listov napr. pomocou optických meracích zariadení (Baret et al., 2010, White, et al. 2019). Táto metóda je veľmi presná a jej použitie je vhodnejšie pre poľnohospodárske plodiny ako pre lesné porasty (Jonckheere, et al. 2004). Nezberová metóda je priamou nedeštruktívnou metódou a je založená na zachytávaní padajúceho listia počas jednej sezóny. Samovoľne padajúce listy listnatých stromov sa zachytávajú do sietí. Priame metódy sú veľmi presné, ich nevýhodou je extrémna časová náročnosť a pracnosť. Využívanie priamych metód na územia s väčšou rozlohou a taktiež v lesníckej praxi sú nevhodné (Pokorný, 2015).

Pri použití nepriamych metód je hodnota indexu listovej plochy odvodená z pozorovania iných premenných. Nepriame metódy sú v porovnaní s priamymi metódami rýchlejšie, merania je možné automatizovať a použiť na väčších územiach (Jonckheere, et al. 2004). Nepriame metódy odvodzujú index listovej plochy na základe meraní prenosu slnečného žiarenia korunovým zápojom s použitím účinných a nedeštruktívnych optických prístrojov (napr. LAI-2000, Tracing Radiation and Architecture of Canopies [TRAC] a Digital Hemispherical Photographs). Tieto nepriame metódy môžeme nazývať aj ako optické nepriame metódy. Nepriame metódy možno považovať aj za metódy merania indexu listovej plochy s nepriamym kontaktom, pretože index listovej plochy sa vyvodzuje na základe vzťahu s inými charakteristikami vegetácie (Bréda, 2003; Yan, 2019). Vývoj metód diaľkového prieskumu Zeme zaznamenal progresívnejšie metódy určenia indexu listovej plochy. Medzi tieto metódy zaradíme systém leteckého laserového skenovania (LLS) resp. LiDAR (Light Detection and Ranging) (Sabol et al., 2014). Systém LiDAR poskytuje efektívne nástroje na odhad priestorového rozloženia LAI pre veľké oblasti a jeho výhodou v rámci diaľkového prieskumu zeme je, že priamo poskytuje trojrozmerné súradnice (Jung, Crawford, 2012; Alonzo et al., 2015; Xu, et al., 2020). Nepriame metódy sa rýchlo rozvíjali a používajú sa od 90. rokov 20. storočia, vo vedeckej komunite sú vysoko uznávané a využívajú sa vo viacerých oblastiach a odvetviach (Yan, 2019).

Lesy v pramenných oblastiach Tatier prechádzajú v posledných rokoch významnými zmenami, súvisiacimi s odumieraním a následnou regeneráciou. Tieto zmeny ovplyvňujú aj hydrologický cyklus, ale odhad ich vplyvu v mierke povodia je možný iba pomocou modelovania. Preto je potrebné vyjadriť tieto zmeny, zmenami parametrov hydrologických modelov, ktoré reprezentujú vplyv vegetácie na hydrologický cyklus. Jedným z takýchto parametrov hydrologických modelov je index

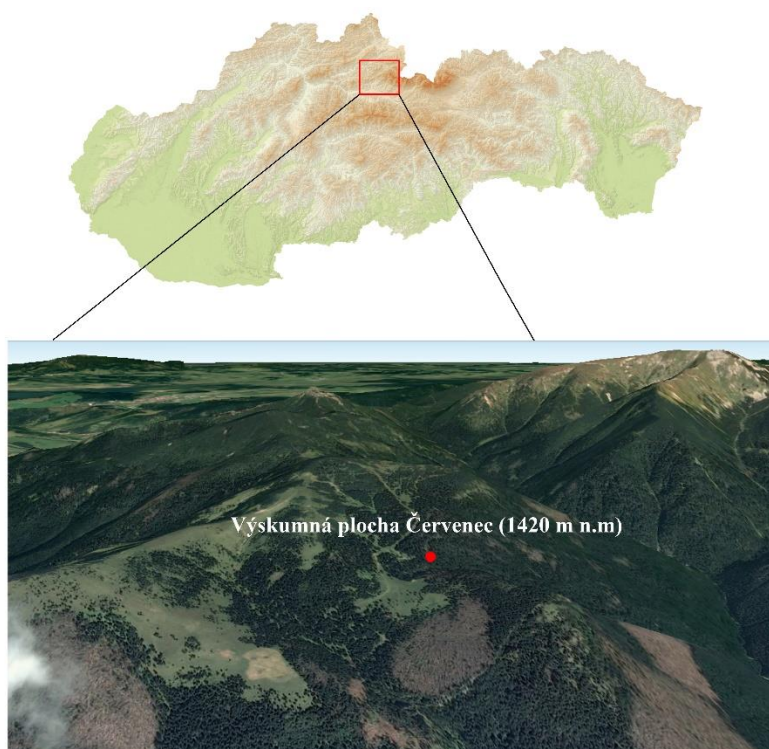
listovej plochy, ktorý sa používa pri výpočte intercepcie a odhade množstva zrážok, ktoré môžu infiltrovať do pôdy.

Cieľom tejto štúdie bolo navrhnuť a vyhodnotiť spôsob odhadu indexu listovej plochy živého a odumretého smrekového porastu, ako aj podrastu, ktorý sa po odumretí smreka začal výrazne rozvíjať. Index listovej plochy podrastu bol odhadnutý aj pre voľnú plochu. Článok prináša výsledky prvých meraní, ktoré boli vykonávané vo vegetačnom období 2023.

Materiál a metódy

Výskumná plocha

Výskumná plocha Červenec sa nachádza v Západných Tatrách v klimaxovej smrečine v nadmorskej výške 1420 m n.m. (Obrázok 1). Je súčasťou povodia Jaloveckého potoka. Územie výskumnej plochy je situované na geologickom rozhraní kryštalinika a mezozoika Vnútrotných Západných Karpát. Z hornín kryštalinika prevládajú prevažne granodiority a ruly. Na nich sa nachádzajú pôdy kambizemné podzoly, sprievodné litozeme a rankre. Z hornín mezozoika sú to prevažne vápence a dolomity, na ktorých sa vyskytujú kambizemné rendziny (Bartík et al., 2014). Táto časť pohoria Západných Tatier patrí do chladnej klimatickej oblasti a do chladného horského, veľmi vlhkého okrsku ((Klimatický atlas Slovenska, 2015). Priemerná ročná teplota vzduchu na Červenci za obdobie 1988-2017 je 3,0 °C a dlhodobý ročný úhrn zrážok je 1450 mm (Danáčová et al., 2019).



Obrázok 1: Výskumná plocha Červenec

Dominantným druhom dreviny je v súčasnom druhovom zastúpení smrek obyčajný (*Picea abies*), vek pôvodných dospelých porastov dosahuje do 150 rokov. V živom poraste je podrast tvorený výlučne brusnicou čučoriedkovou (*Vaccinium myrtillus* L.). Voľná plocha je zastúpená v prevažnej miere brusnicou čučoriedkovou (*Vaccinium myrtillus*), v menšom rozsahu sa tu taktiež vyskytuje ostružina malinová (*Rubus idaeus*), jarabina vtáčia (*Sorbus aucuparia*), silenka červená (*Silene dioica*) a prirodzené zmladenie smreka. V odumretom poraste, kde aktuálne prebieha sukcesia je podrast najpestrejší. Je tvorený druhmi brusnica čučoriedková (*Vaccinium myrtillus*), ostružina malinová (*Rubus idaeus*), jarabina vtáčia (*Sorbus aucuparia*), starček (*Senecio* sp.), srnovník purpurový

(*Prenanthes purpurea*), chlpaňa lesná (*Luzula sylvatica*), v menšom rozsahu sa tu ešte vyskytujú druhy silenka červená (*Silene dioica*) a papraď ostnatá (*Dryopteris cartusiana*).

Skúmaná lokalita má juhovýchodnú expozíciu so sklonom 20°–33°. V súčasnosti má výskumná plocha rozlohu cca 1000 m² (z toho živý porast – 360 m², mŕtvy porast – 220 m², voľná plocha – 450 m²). Priemerná výška stromov je 26,8 m a priemerná stredná hrúbka kmeňa je 40,5 cm. Zakmenenie porastov je nízke, okolo 0,6.

Stanovenie efektívneho indexu listovej plochy a indexu drevnej plochy korunového zápoja živého a odumretého porastu

Odhad efektívneho indexu listovej plochy (LAIe) a indexu drevnej plochy (WAI) sme v oboch porastoch realizovali počas vegetačného obdobia 2023 v troch termínoch, 16. júna, 8. augusta a 19. októbra. Je tiež dôležité uvedomiť si, že v odumretom lese hodnota určená ako index listovej plochy nezodpovedá ploche listov ("ihličia"), ktoré sa tam už nenachádzajú, ale je to skôr "index drevnej plochy". Na určenie LAIe a WAI korunového zápoja v porastoch sme použili hemisférickú fotografiu. Následne sme založili tranzekt v živom a v mŕtvom poraste. Na tranzekte v živom poraste (dĺžka 28 m) sme vyznačili 7 bodov vo vzdialenosti 3–6 m. Na tranzekte v mŕtvom poraste (dĺžka 16 m) sme vyznačili 4 body vo vzdialenosti 5–6 m. Na miestach, kde sme fotografovali, sme tieto body označili drevenými kolíkmi, aby sme zabezpečili, že fotografie v iných dátumoch merania budú nasnímané na rovnakých miestach. Počet týchto bodov nebol rovnaký a závisel od veľkosti plochy, ktorá pokrýva zvyšok živého a mŕtveho lesa. Na rozdiel od tradičných meraní, ktoré sa bežne vykonávajú v lesníctve, sme nemali možnosť robiť ich v homogénnom poraste veľkej rozlohy. Vzhľadom na sklon svahu bola v oboch porastoch zvolená orientácia tranzektov po vrstevnici. Výška stromov v oboch porastoch je približne rovnaká. V rámci tranzektových línií sme sa snažili zachytiť všetky koruny stromov. Fotografovali sme digitálnym fotoaparátom Canon EOS 50D s objektívom Sigma EX DC s ohniskovou vzdialenosťou 4,5 mm (rybie oko) a rozlíšením 15 MB (Obrázok 2).



Obrázok 2: Fotoaparát Canon EOS 50D (vľavo) a prístroj SunScan (vpravo)

Fotoaparát bol umiestnený na statíve (1,3 m od povrchu zeme), jeho horizontálna poloha, ktorá zabezpečuje smerovanie objektívu kolmo nahor, bola kontrolovaná vodováhou a fotoaparát bol pomocou kompasu orientovaný tak, aby horný okraj fotografie smeroval na sever. Fotografie boli snímané s prioritou clony (F 8.00) s bracketingom. Z troch takto získaných fotografií bola pre spracovanie vybraná tá z nich, ktorá mala subjektívne najlepší kontrast.

Fotografie vo formáte jpg. boli spracované pomocou softvéru HemiView (Delta-T Devices, 1999). Na fotografiách z každého bodu bolo potrebné odfiltrovať okolitý terén (zaznamenaný podrast), čo softvér HemiView umožňuje. Konečné spracovanie bolo realizované s fotografiami, orezanými podľa kruhovej šablóny, ktorá bola pre všetky lokality rovnaká (Obrázok 3). Hraničná hodnota, ktorá pri klasifikácii fotografie oddeľuje viditeľnú oblohu od vegetačného pokryvu (ihličia), bola pre konečné určenie efektívneho indexu listovej plochy rovnaká pre všetky vyhodnocované fotografie.

Takto získané hodnoty indexu listovej plochy v živom poraste neboli korigované indexom zhlukovania (clumping index). Efekt zhlukovania je dôležitým faktorom, ktorý koriguje nepriame merania indexu listovej plochy. Tento index v rôznych mierkach kvantifikuje priestorový vzor distribúcie listov (ihlíc) a je transformujúcim faktorom na výpočet skutočnej hodnoty indexu listovej plochy z efektívneho indexu listovej plochy (Bao et al., 2018). Preto je v našom prípade vhodné označiť index listovej plochy (LAI) ako efektívny index listovej plochy (LAI_e).



Obrázok 3: Příklad spracovania fotografie, vľavo-pôvodná fotografia v živom a v mŕtvom poraste) a vpravo-kruhovo orezaná fotografia v programe Hemiview

Stanovenie indexu listovej plochy podrastu voľnej plochy, živého a odumretého porastu

Meranie indexu listovej plochy podrastu v obidvoch porastoch (živý, mŕtvý) a na voľnej ploche sme vykonávali pomocou prístroja SunScan (Delta T). Drevené kolíky v porastoch, ktorými sme si označili body na fotenie hemisferických fotografií sme využili ako transektové línie medzi, ktorými sme realizovali merania indexu listovej plochy (LAI) podrastu prístrojom Sunscan. Na voľnej ploche sme si podobne, ako v porastoch pomocou dvoch drevených kolíkov stanovili transektovú líniu.

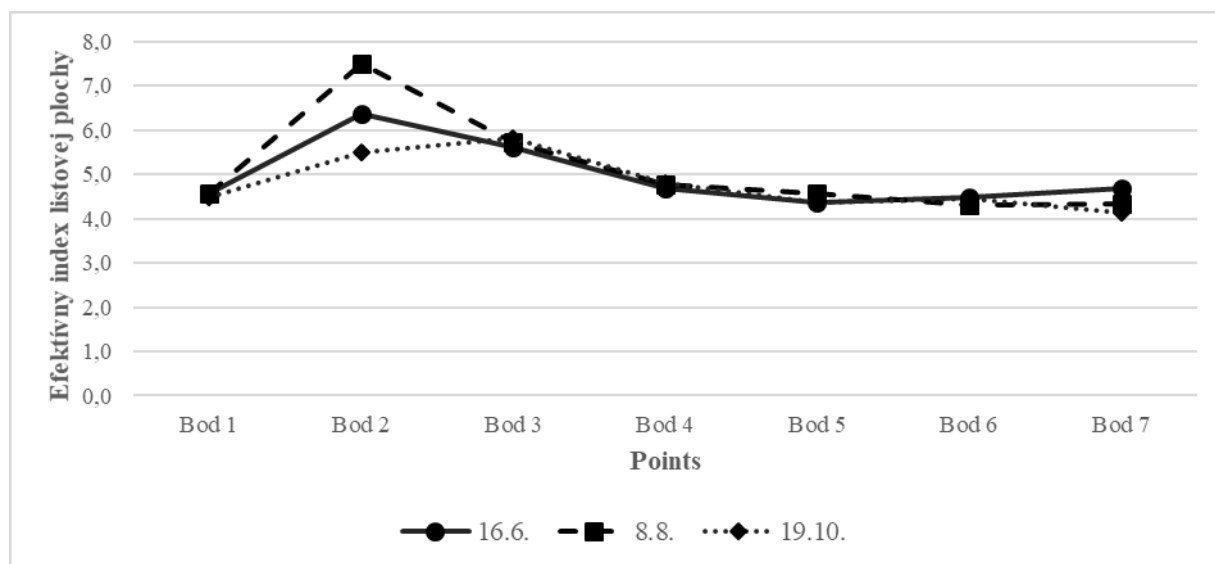
Prístroj SunScan (Obrázok 2) sa skladá z prenosnej sondy, ktorá je 1 m dlhá a obsahuje 64 kalibrovaných fotodiód, ktoré sú rovnomerne rozmiestnené po celej jej dĺžke a merajú tok

fotosynteticky aktívneho žiarenia (PAR) pod korunovým zápojom danej plodiny resp. typu vegetácie. Ďalšou súčasťou tohto zariadenia je Beam fraction senzor (BFS) - snímač slnečných lúčov, ktorý meria priame a difúzne dopadajúce žiarenie nad korunovým zápojom danej plodiny, resp. typ vegetácie, čo je potrebné na výpočet indexu listovej plochy. Sonda a BFS senzor sú vybavené anténami, na základe vyžarovania rádiových vln sú medzi sebou prepojené. Sonda je ďalej vybavená káblom, ktorý je cez konektor sériového portu RS232 prepojený s PDA zariadením. PDA (značka trimble) je malé prenosné elektronické zariadenie, kde je nainštalovaný softvér SunData, do ktorého sú uložené a následne vypočítané namerané hodnoty LAI resp. PAR. V softvéri SunData sme si pred meraním museli nastaviť hodnotu absorpcie listov (leaf absorbtion value). Je to percento dopadajúceho fotosynteticky aktívneho žiarenia (PAR), absorbované listom. Väčšina listov má hodnoty absorpcie v rozsahu 0,8 - 0,9, takže štandardná hodnota, ktorá sa vo väčšine prípadov používa je 0,85. Ďalší parameter, ktorého hodnotu sme museli zadať pred meraním bol Ellipsoidal Leaf Angle Distribution Parameter (ELADP), to je parameter rozloženia uhla listu, je to taktiež spôsob ako charakterizovať horizontálny alebo vertikálny smer listov v zápoji daného druhu vegetácie. Pre väčšinu plodín je hodnota ELADP v rozmedzí 0,5 až 2,0. My sme v našom prípade použili hodnotu 1,0, ktorá bola predpísaná v manuály.

Výsledky a diskusia

Efektívny index listovej plochy a index drevnej plochy korunového zápoja živého a odumretého porastu

Obrázok 4 znázorňuje, že sezónna variabilita efektívneho indexu listovej plochy na väčšine zo 7 bodov v živom lese, kde boli zhotovené hemisférické fotografie, je zanedbateľná. Výnimku sme zaznamenali v bode číslo 2, kde sa hodnoty efektívneho indexu listovej plochy v jednotlivých termínoch výraznejšie líšili. Kontrola fotografií naznačila, že muselo dôjsť k chybe pri fotografovaní (napr. iná výška statívu alebo nenasmerovanie fotoaparátu na sever).

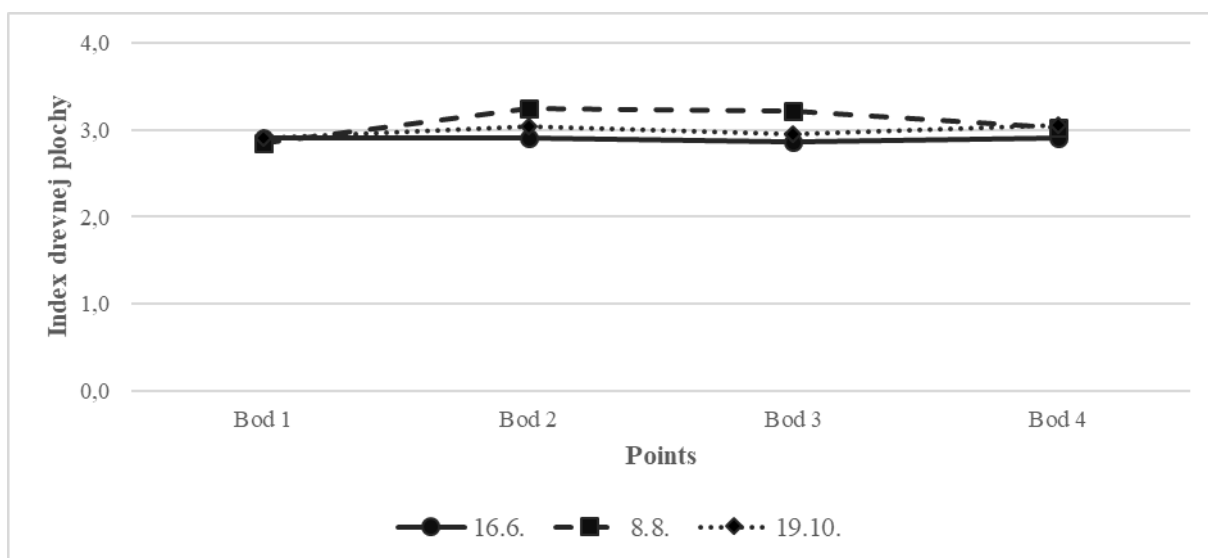


Obrázok 4: Hodnoty efektívneho indexu listovej plochy v živom poraste

K výraznejším zmenám indexu listovej plochy v živom smrekovom poraste dochádza v tejto oblasti na začiatku vegetačného obdobia približne v mesiacoch apríl a máj v závislosti od teploty vzduchu a dĺžky trvania snehovej pokrývky (Škvareninová, 2009), kedy môžeme pozorovať na základe metodického postupu SHMÚ (Kolektív, 1984) nasledovné vegetatívne fenofázy: a.) pučanie ihlicových púčikov, b.) rozpučanie ihlicových púčikov, c.) prvé májové výhonky, d.) konečné oihličenie.

V tomto období by hodnoty efektívneho indexu listovej plochy pre živý smrekový porast nemali byť rovnaké. Vzhľadom na to, že všetky tri merania boli realizované už vo fenofáze maximálneho ohličenia a naše predchádzajúce merania v Jaloveckej doline (Danko et al., 2018) ukázali pomerne malú sezónnu variabilitu smrekového porastu rôzneho veku, preto výsledky získane pre bod 2 pokladáme za neobvyklé. Podobné výsledky pre 30-ročný smrekový monokultúrny porast uvádzajú aj Pokorný et al. (2008), kde neboli zistené výraznejšie rozdiely medzi získanými hodnotami indexu listovej plochy v priebehu mesiacov august až september po dosiahnutí sezónneho maxima. Priemerné hodnoty efektívneho indexu listovej plochy v jednotlivých termínoch merania boli 5,0 v júni, 5,1 v auguste a 4,8 v októbri. Priemerná hodnota efektívneho indexu listovej plochy v živom lesnom poraste bola 5,0.

Hodnoty indexu drevnej plochy odhadnuté pre odumretý porast sú znázornené na Obrázku 5. Hodnoty zostali pomerne stabilné a pohybovali sa od 2,9 do 3,2. Z toho vyplýva, že priemerné hodnoty indexu drevnej plochy boli 2,9 v júni; 3,1 v auguste a 3,0 v októbri. Priemerná hodnota indexu drevnej plochy v odumretom lesnom poraste bola 3,0.



Obrázok 5: Hodnoty indexu drevnej plochy v odumretom poraste

Odhadom indexu listovej plochy lesných porastov sa vo svete zaoberá a zaoberalo veľké množstvo štúdií. Index listovej plochy je kľúčovým parametrom pre globálne a regionálne modely biosférickej/atmosférickej výmeny oxidu uhličitého, vodnej pary a iných materiálov. Zohráva tiež kľúčovú úlohu pri určovaní energetickej bilancie zemského povrchu.

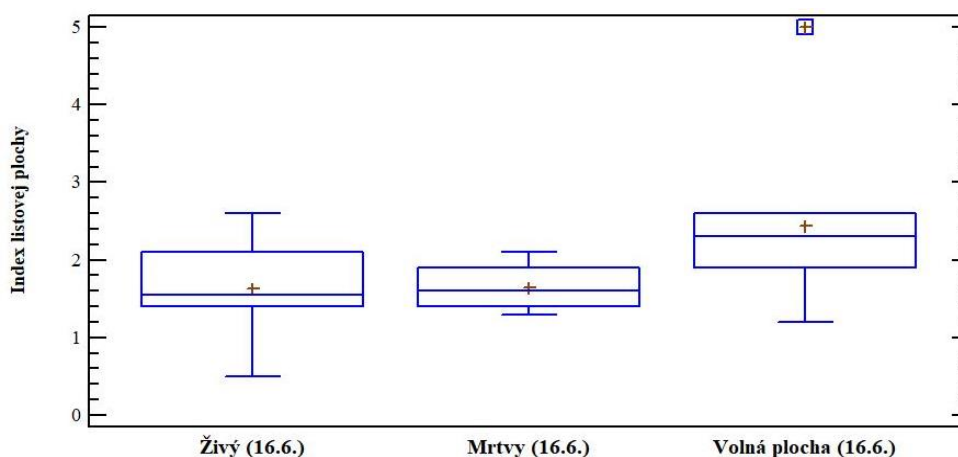
Stanovenie indexu listovej plochy v porastoch lesných drevín je závislé hlavne na druhovom zložení a štruktúre porastu. Vose et al. (1994) uvádzajú, že hodnoty indexu listovej plochy ihličnatých drevín dosahujú vo väčšine prípadov maximálne hodnoty 6 až 8. Najvyššie hodnoty dosahujú ihličnaté lesy, ktoré sa skladajú z druhov duglaska, jedla, jedlovec a smrek. Chen et al. (1997a) uvádzajú pre boreálne lesy (*Picea marina*, L.) rôzneho veku v Kanade hodnoty indexu listovej plochy od 1 do 6.

Dôležitým parametrom pri stanovení indexu listovej plochy je okrem štruktúry aj vek porastu. Vzťah medzi indexom listovej plochy a vekom v porastoch smreka obyčajného ukázali, že index listovej plochy sa postupne znižuje s pribúdajúcim vekom porastov. 15 ročný smrekový porast dosahoval LAI 8,2, kým 100 ročný smrekový porast dosahoval hodnotu 4,35 (Pokorný, Stojnič, 2012). Podobné výsledky, kedy sa index listovej plochy s pribúdajúcim vekom smrekových porastov znižuje uvádza aj Homolová et al. (2007) a Kram (1998). Ďalším významným parametrom pri stanovení indexu listovej plochy je aj zakmenenie porastu. Kůšner, Mosandl, 2000 uvádzajú pre dospelé smrekové porasty (cca 100 rokov) rôzneho zakmenenia hodnoty LAI v rozmedzí 0,68 – 4,84. Stanovením efektívneho indexu

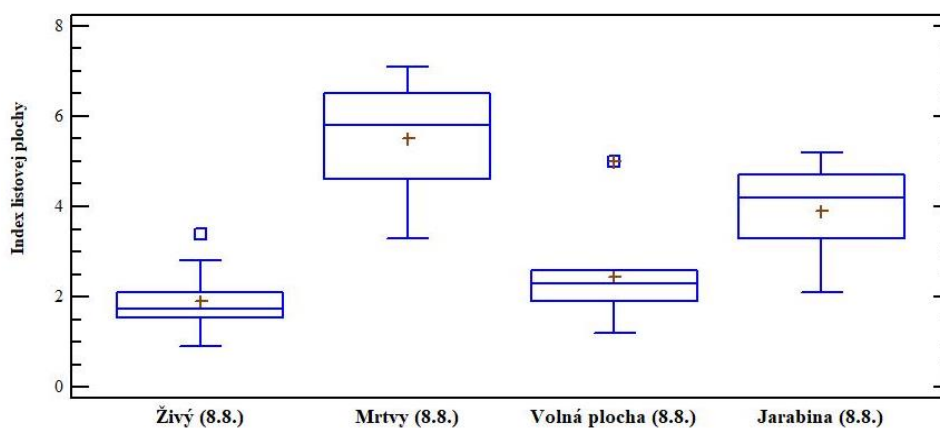
listovej plochy v 80 až 90 ročnom smrekovom poraste v povodí Liz (Šumava) sa zaoberali aj Dohnal et al. (2014), efektívny index listovej plochy dosahoval hodnoty v rozmedzí od 3,54 do 3,75.

Index listovej plochy podrastu voľnej plochy, živého a odumretého porastu

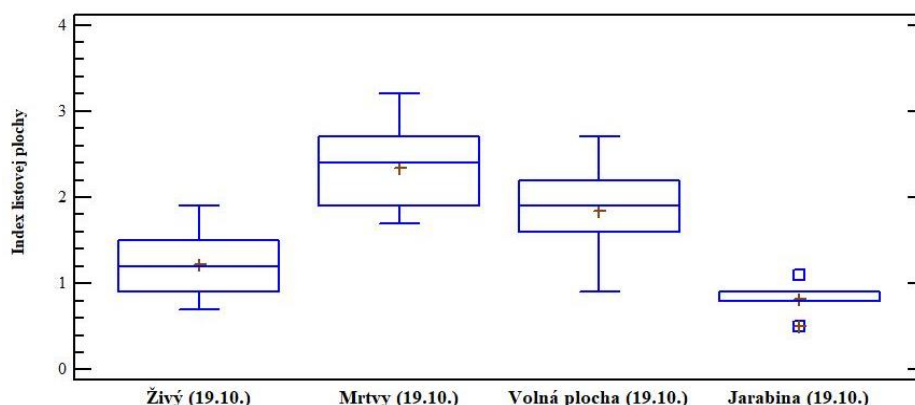
Z Obrázku 6 môžeme vidieť, že pri prvom meraní 16.6. sme zaznamenali v živom a v mŕtvom poraste takmer identické priemerné hodnoty indexu listovej plochy podrastu (živý - 1,6, mŕtvy - 1,7). Najvyššiu priemernú hodnotu dosahuje podrast na voľnej ploche (2,4). Najvyšší rozsah hodnôt sme zaznamenali na voľnej ploche, najmenší rozsah dosahoval mŕtvy les. Pri meraniach 8.8. sme na voľnej ploche okrem podrastu brusnice čučoriedkovej, začali s meraním indexu listovej plochy pod jarabinou vtáčou. Na základe meraní z 8.8. vidíme, že najvyššie priemerné hodnoty indexu listovej plochy dosahuje v poradí: mŕtvy les (5,5) > jarabina (3,9) > voľná plocha (2,9) > živý les (1,9). Najvyšší rozptyl hodnôt sme zaznamenali znova na voľnej ploche, najmenší rozsah dosahoval živý les (Obrázok 7). Pri poslednom meraní 19.10. sme najvyššie priemerné hodnoty indexu listovej plochy zaznamenali v mŕtvom lese (2,3), ďalej nasledovala voľná plocha (1,8), živý les (1,2) a najmenšie hodnoty dosahovala jarabina (0,8). Najvyšší rozsah hodnôt sme zaznamenali na voľnej ploche, najmenší rozsah bol zaznamenaný v jarabine (Obrázok 8).



Obrázok 6: Krabicové grafy (maximum-minimum; dolný a horný kvartil; median; krížiky zobrazujú aritmetický priemer; štvorec zobrazuje odľahlé hodnoty) hodnôt indexu listovej plochy podrastu v priebehu 16.6. 2023



Obrázok 7: Krabicové grafy hodnôt indexu listovej plochy podrastu v priebehu 8.8. 2023



Obrázok 8: Krabicové grafy hodnôt indexu listovej plochy podrastu v priebehu 19.10. 2023

Pri prvom meraní 16.6. bol podrast najmenej rozvinutý v mŕtvom lese, preto sme zaznamenali takmer identické hodnoty v porovnaní so živým lesom. V živom lese a aj na voľnej ploche bola brusnica čučoriedková zalistená už na 100%. Pri porovnaní brusnice čučoriedkovej na voľnej ploche a v živom lese, na voľnej ploche dosahuje čučoriedka vyššiu pokrývnosť a vzrastom je aj vyššia ako v živom lese, z toho dôvodu dosahuje index listovej plochy na voľnej ploche vyššie hodnoty.

Pri druhom meraní začiatkom augusta môžeme sledovať, že index listovej plochy sa zvýšil na všetkých pozorovaných lokalitách. Najvýraznejšie zvýšenie sme zaznamenali v mŕtvom lese, kde bol podrast naplno vyvinutý. Byliny, ktoré tvoria tento podrast boli plne rozvinuté. Na voľnej ploche a v živom lese mala čučoriedka už nasadené plody, ktoré boli v plnej zrelosti, to malo vplyv na mierne zvýšenie hodnôt indexu listovej plochy na týchto dvoch lokalitách.

Pri poslednom meraní sledujeme pokles hodnôt indexu listovej plochy, na všetkých sledovaných lokalitách, keďže v tomto období sme zaznamenali opad listov na brusnici čučoriedkovej v živom lese aj na voľnej ploche, taktiež jarabina vtáčia až mala opadnuté listy. V mŕtvom poraste ešte k úplnému opadu listov nedošlo, jednalo sa o druh ostružiny malinovej.

Záver

Na základe prvotných meraní hodnôt indexu listovej plochy podrastu v živom, v mŕtvom lese a na voľnej ploche sme zistili, že hodnoty indexu listovej plochy sa v priebehu vegetačného obdobia (máj-október) dynamicky menia vplyvom vývoja fenofáz jednotlivých pozorovaných druhov. Najvyššie hodnoty sme na všetkých sledovaných plochách zaregistrovali v auguste (8.8.), kedy bola vegetácia plne zalistená a dosahovala najvyššiu pokrývnosť. Naopak v priebehu októbra (19.10.) sme na všetkých pozorovaných lokalitách zaznamenali najnižšie hodnoty indexu listovej plochy podrastu.

Pri hodnotení efektívneho indexu listovej plochy a indexu drevnej plochy korunovej vrstvy živého a odumretého porastu sa tieto hodnoty v priebehu vegetačného obdobia výraznejšie nemenili. Priemerná hodnota efektívneho indexu listovej plochy v živom poraste je 5,0 a priemerná hodnota indexu drevnej plochy v mŕtvom poraste je 3,0.

PodĎakovanie

Tento príspevok je súčasťou realizácie výsledkov projektu VEGA č.: 2/0019/23. Autor ďakuje agentúre za podporu.

Použitá literatúra

- Alonzo, M., Bookhagen, B., McFadden, J. P., Sun, A., Roberts, D. A., 2015. Mapping urban forest leaf area index with airborne lidar using penetration metrics and allometry. *Remote Sensing of Environment*, 162, 141-153.
- Bao, Y., Ni, W., Wang, D., Yue, C., He, H., Verbeeck, H., 2018. Effects of tree trunks on estimation of clumping index and LAI from HemiView and Terrestrial LiDAR. *Forests*, 9 (3), 144.
- Baret, F., de Solan, B., Lopez-Lozano, R., Ma, K., Weiss, M., 2010. GAI estimates of row crops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5 zenith angle: Theoretical considerations based on 3D architecture models and application to wheat crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (11), 1393-1401.
- Bartík, M., Sitko, R., Oreňák, M., Slovák, J., Škvarenina, J., 2014. Snow accumulation and ablation in disturbed mountain spruce forest in West Tatra Mts. *Biologia*, 69 (11), 1492-1501.
- Bréda, N. J., 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of experimental botany*, 54 (392), 2403-2417.
- Danáčová, M., Danko, M., Lajda, D., 2019. Vplyv spôsobu určenia teplotného faktora na simuláciu vodnej hodnoty snehu. *Meteorologický časopis*, 22 (1), 11-12.
- Danko, M., Holko, L., Škvareninová, J., Škvarenina, J., 2018. Seasonal variability of the leaf area index of spruce forest of different age in the Western Tatra Mountains. *Acta Hydrologica Slovaca*, 19 (2), 2018, 210-219.
- Dohnal, M., Černý, T., Votrubová, J., Tesař, M., 2014. Rainfall interception and spatial variability of throughfall in spruce stand. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62 (4), 277-284.
- Delta-T Devices, 1999. User manual for HemiView, Version 2.1, 79 p.
- Dufrêne, E., Bréda, N., 1995. Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods. *Oecologia*, 104, 156-162.
- Fassnacht, K. S., Gower, S. T., Norman, J. M., McMurtric, R. E., 1994. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71 (1-2), 183-207.
- Hančinský, L., 1972. Lesné typy Slovenska. *Príroda*, Bratislava, 307 s.
- Homolová, L., Malenovský, Z., Hanuš, J., Tomášková, I., Dvořáková, M., Pokorný, R., 2007. Comparison of different ground techniques to map leaf area index of Norway spruce forest canopy. In: ISPRS Working Group VII/1 Workshop ISPMRS'07: "Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing", Davos (CH), 12 March 2007 - 14 March 2007. ISPRS, 499-504.
- Chason, J. W., Baldocchi, D. D., Huston, M. A., 1991. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57 (1-3), 107-128.
- Chen, J. M., Black, T. A., 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 15 (4), 421-429.
- Chen, J. M., Blanken, P. D., Black, T. A., Guilbeault, M., Chen, S., 1997a. Radiation regime and canopy architecture in a boreal aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86 (1-2), 107-125.
- Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., Plummer, S., 1997b. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102 (D24), 29429-29443.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., Baret, F., 2004. Methods for leaf area index determination. Part I: Theories, techniques and instruments. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 19-35.
- Jung, J., Crawford, M. M., 2011. Extraction of features from LIDAR waveform data for characterizing forest structure. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9 (3), 492-496.
- Klimatický atlas Slovenska, 2015. *Slovenský hydrometeorologický ústav*, Bratislava, 132 s.
- Kolektív, 1984. *Návod pre fenologické pozorovanie lesných rastlín*. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, 23 s.
- Kram, K. J., 1998. Influence of species composition and forest age on leaf area index. *Polish Journal of Ecology*, 46 (1), 75-88.

- Küßner, R., Mosandl, R., 2000. Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany. *Canadian Journal of Forest Research*, 30 (3), 440-447.
- Pavlendová, H., 2010. Index listovej plochy. In: Monitoring lesov Slovenska. Správa za ČMS Lesy a projekt FutMon za rok 2009 (eds. Pavlenda, P., Pajtík, J.). Zvolen, NLC-LVÚ, s.105-107.
- Pokorný, R., Opluštilová, M., 1999. Leaf area index and its development in selected spruce and beech stands in the Ore Mountains. *Journal of Forest Science*, 45 (4), 192-196.
- Pokorný, R., Tomášková, I., Havráňková, K., 2008. Temporal variation and efficiency of leaf area index in young mountain Norway spruce stand. *European Journal of Forest Research*, 127, 359-367.
- Pokorný, R., Stojnič, S., 2012. Leaf area index of Norway spruce stands in relation to age and defoliation. *Beskydy*, 5 (2), 173-180.
- Pokorný, R., 2015. *Determination of leaf area index in not mixed stands of forest trees*. Brno: Centrum výzkumu globální změny AV ČR, ISBN 978-80-87902-08-0, 38 p.
- Rich, P. M., Chen, J., Sulatycki, S. J., Vashisht, R., Wachspress, W. S., 1995. Calculation of leaf area index and other canopy indices from gap fraction: a manual for the LAICALC software. *Kansas Applied Remote Sensing Program Open File Report*. 13 p.
- Sabol, J., Patocka, Z., Mikita, T., 2014. Usage of LiDAR data for leaf area index estimation. *GeoScience Engineering*, 60 (3), 10.
- Scurlock, J. M. O., G. P. Asner, G. P., Gower, S. T., 2001. *Worldwide Historical Estimates and Bibliography of Leaf Area Index, 1932-2000*. ORNL Technical Memorandum TM-2001/268, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 23 p.
- Stanová, V., Valachovič, M. (eds.), 2002. Katalóg Biotopov Slovenska. DAPHNE – Inštitút aplikovanej ekológie, Bratislava, 225 p.
- Škvareninová, J., 2009. The dynamics of vegetative phenophases observed at the autochthon population of Norway spruce ([L.] Karst.) in Slovakia. *Central European Forestry Journal*, 55 (1), 13-27.
- White, W. A., Alsina, M. M., Nieto, H., McKee, L. G., Gao, F., Kustas, W. P., 2019. Determining a robust indirect measurement of leaf area index in California vineyards for validating remote sensing-based retrievals. *Irrigation Science*, 37, 269-280.
- Xu, J., Quackenbush, L. J., Volk, T. A., Im, J. 2020. Forest and crop leaf area index estimation using remote sensing: Research trends and future directions. *Remote Sensing*, 12 (18), 2934.
- Yan, G., Hu, R., Luo, J., Weiss, M., Jiang, H., Mu, X., Xie, D., Zhang, W., 2019. Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and forest meteorology*, 265, 390-411.
- Zheng, G., Moskal, L. M., 2009. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors*, 9 (4), 2719-2745.

Meteorological data analysis from a forestry perspective in the Sopron Botanical Garden's station in Hungary

Lili Muraközy

1 Annotation

Monitoring the hydrometeorological processes for centuries is crucial for analysing the water balance of forests. In contrast, long-term measurements are essential for evaluating the impact of climate change. Many people have researched climate change, but this station has not yet been processed in the long term. In an unprocessed station, several different kinds of data errors need correction (lack of data, human errors, etc.).

Keywords: long-time measurements, hydrology, forestry

2 Abstrakt

Lesnícka analýza údajov z meteorologickej stanice v botanickej záhrade v Šoproni

Monitorovanie hydrometeorologických procesov v priebehu desaťročí/stáročí je nevyhnutné na pochopenie hydrologického režimu dlhodobého ekosystému, akým je les. Na druhej strane sú dlhodobé merania nevyhnutné aj na posúdenie vplyvov klimatických zmien. Vzťahy medzi lesmi a hydrológiou sú mimoriadne rozmanité. Existenciu a kvalitu lesov zásadne ovplyvňujú hydrologické podmienky. Klimatické zmeny ovplyvňujú vodné pomery aj lesy. Meteorologické pozorovania v Šoproni, ktoré trvajú niekoľko sto rokov, poskytujú dlhodobý súbor údajov, hoci sú nespracované údaje zaťažené rôznymi chybami, ich opravou možno vytvoriť širokú škálu meteorologických a hydrometeorologických analýz. Cieľom tejto práce je zjednotiť a analyzovať údaje zo stanice Botanickej záhrady v Šoproni, vytvoriť databázu z opravených údajov a použiť ju na zjednodušené spracovanie hydrologických, meteorologických a lesníckych údajov. Súčasťou práce bolo aj použitie indexu FAI.

Z porovnania dvoch 30-ročných období vyplýva, že teploty sa za posledných 30 rokov v porovnaní s predchádzajúcimi 30 rokmi výrazne zvýšili (1930-1960: žiadny významný rozdiel, 1989-2019: 1,68 °C/30 rokov). Osobitnú pozornosť si zaslúži zvýšený úhrn zrážok nad 20 mm od roku 1989 do roku 2019. Aj keď v súčasnom období bolo celkovo o niečo viac zrážok, stojí za to zvážiť ich rozdelenie, pretože nižšie úhrny zrážok (v rozmedzí 10 - 20 mm) sú pre lesný ekosystém oveľa prospešnejšie ako nízke úhrny zrážok s vyššou intenzitou. Krátkodobé vysoké úhrny zrážok majú tendenciu produkovať viac povrchového odtoku, ktorý je pre les menej prospešný.

Z analýzy FAI vyplýva, že hodnota FAI v regióne za posledných 150 rokov sa zvýšila v priemere o jednu klimatickú kategóriu (z hranice bukovej a hrabovej dubovej klímy na hranicu hrabovej a sedlovej dubovej klímy). Počet rokov s požadovanou vysokou výškou zdravotnej ťažby v regióne má silnú závislosť s rokmi s vysokými hodnotami FAI (keď dosahoval v priemere 7 rokov v klíme KTT, t. j. 6 a viac).

Za posledné desaťročia sa zmenilo načasovanie a intenzita zrážok a teploty majú neustále rastúci trend. Tieto skutočnosti by mohli v budúcnosti predstavovať čoraz väčšie problémy pri hospodárení so zdrojmi, a preto je potrebné politiku v oblasti drevín ešte viac prispôsobiť klimatickým zmenám a rastúcim vplyvom Stredomoria (viac druhov drevín odolných voči suchu, zásahy na zvýšenie odolnosti lesov a zadržiavanie vody).

Vylepšená databáza Botanickej záhrady umožní vykonať celý rad analýz, napr. analýzy FAI, intercepcie, evapotranspirácie, snehovej pokrývky a zmien vodnej bilancie. Okrem toho spracovaním ďalších klimatických staníc v Šopronskom pohorí bude možné ich vzájomné porovnanie, čo poskytne komplexnejší obraz o vplyve klimatických zmien v regióne.

3 Introduction

Analyzing the water balance of forests requires long monitoring of hydrometeorological processes. Long-term measurements, however, are also essential for assessing the effects of climate change. In Sopron, meteorological records—one of the first systematic analyses in Hungary—started in 1711. From 1925.06.01 to 1974.04.24, the Botanical Garden's meteorological station at the University of Sopron was the city's official station. In 1974, the official station was relocated to Kuruc Hill Observatory. The remaining instruments in the Botanical Garden were still functional. Many people have researched climate change, but this station has not yet been processed in the long term. In an unprocessed station, several data errors need correction (lack of data, human errors, etc.) The paper presents the primary data processing for hydrometeorological purposes, error analysis, the integration of the station's data, and FAI (Forest Aridity Index) analysis.

4 Material and methods

The placement of the station was in the botanical garden on the campus of the University of Sopron.

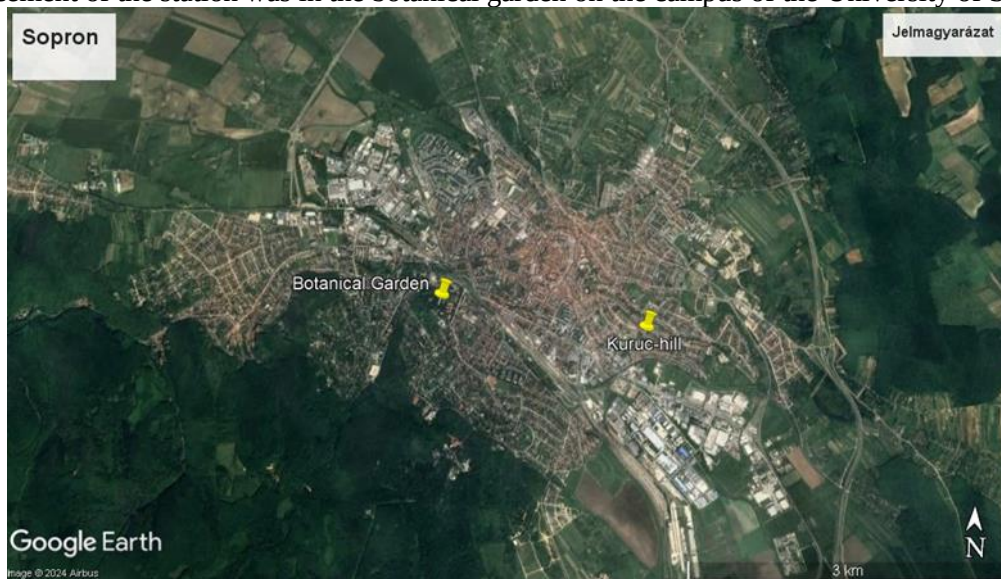


Figure 1: Location of the botanical garden and the Kuruc-hill station

Instruments:

The meteorological instruments used for the measurements were: (it is the same that used in almost every station in Hungary).

Precipitation: with Hellmann rain gauge.

Temperature extremes: maximum with a mercury thermometer, minimum with an alcohol thermometer.

Temperature and humidity: with a pair of dry-wet aspiration thermometers (after November 2019, BOREAS automatic). (Pödör, 1985)

There were data errors, too, which needed correction.

There were different types of data errors detected:

unrealistically large or small values due to misclicks (these were gross errors), the maximum temperature was lower than the minimum (these were subtle mistakes), the average temperature is not between the minimum and maximum (these were subtle mistakes)

5 Results and discussion

Results and discussion

First, we made data corrections with the help of a program coded in R. We filtered out the gross errors using R:

Some examples of maximum temperature errors:

1997-08-16 263.0

2000-04-21 262.0.

Some examples of minimum temperature errors:

1988-07-09 1505.0

1997-07-24 152.0.

For comparison, we made a representation of the temporal evolution of the yearly average temperature and precipitation sum between 1870-2021 for the homogenized data of Kuruc Hill station (Karl, 1986) and extracted the precipitation trend: 79mm/150 years, and temperature trend: 1,61°C/150 year (more significant rise since 1990)

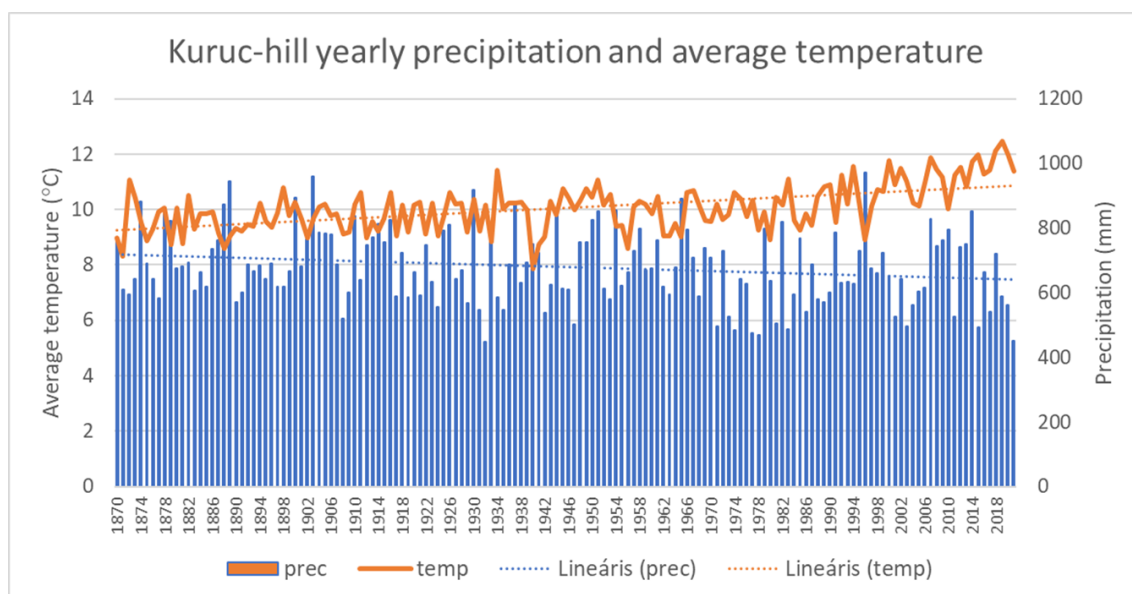


Figure 3: Kuruc-hill yearly precipitation and average temperature

Comparison of the last 30-year average temperature of Kuruc Hill and Botanical Garden station with raw data, with corrected gross error, and with corrected data are shown in Figures 4, 5 and 6.

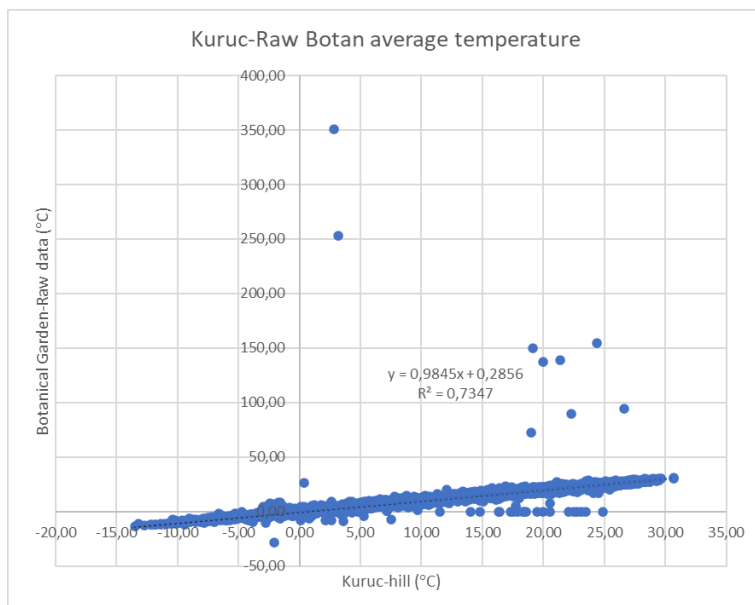


Figure 4: Comparison of Kuruc-hill's and raw Botanical garden's temperature

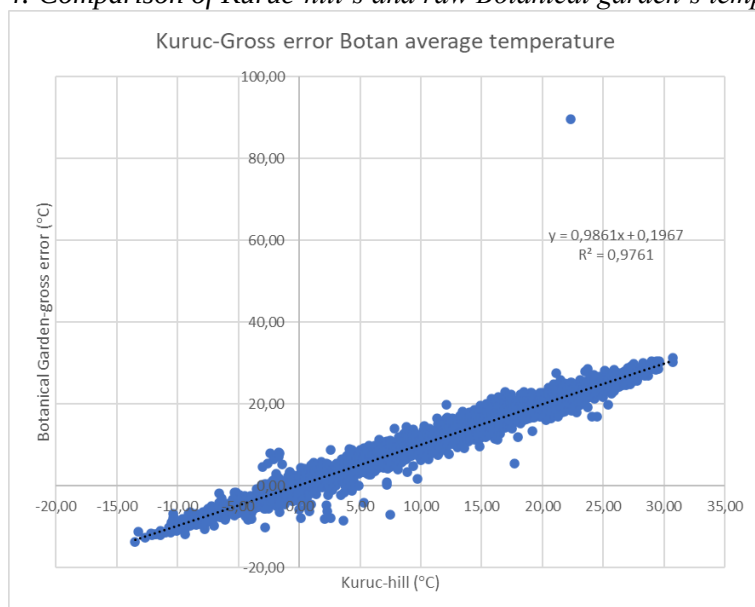


Figure 5: Comparison of Kuruc-hill's and gross error Botanical garden's temperature

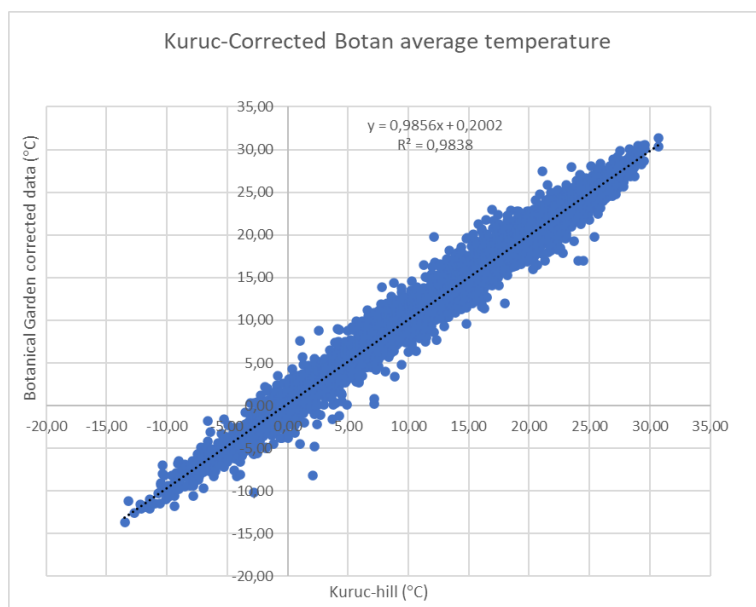


Figure 6: Comparison of Kuruc-hill's and corrected Botanical garden's temperature

The high value of R^2 indicates that the correlation is strong in the two data series, and after removing the errors, the correlation seems to improve ($R^2 = 0.9838$).

We compared the precipitation distribution of the Botanical Garden's corrected daily data. I categorized precipitation and summarised the individual categories to get the precipitation amounts per category in Figures 7 and 8.

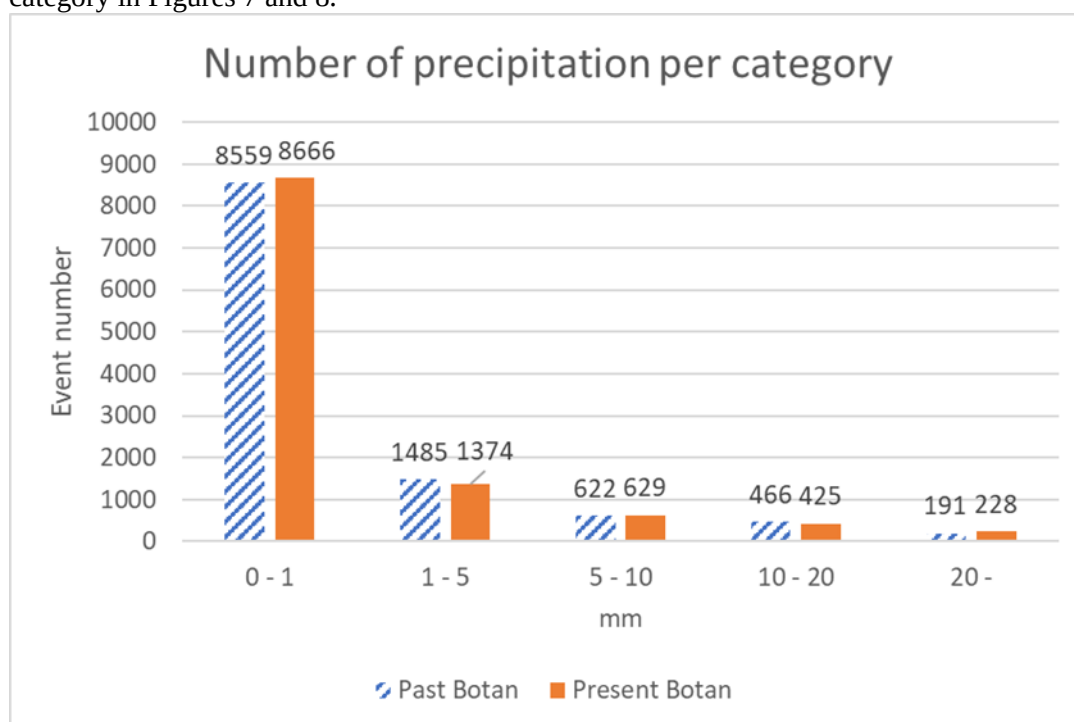


Figure 7: Comparison of 1930-1960 (blue) and 1989-2019 (orange) precipitation by category

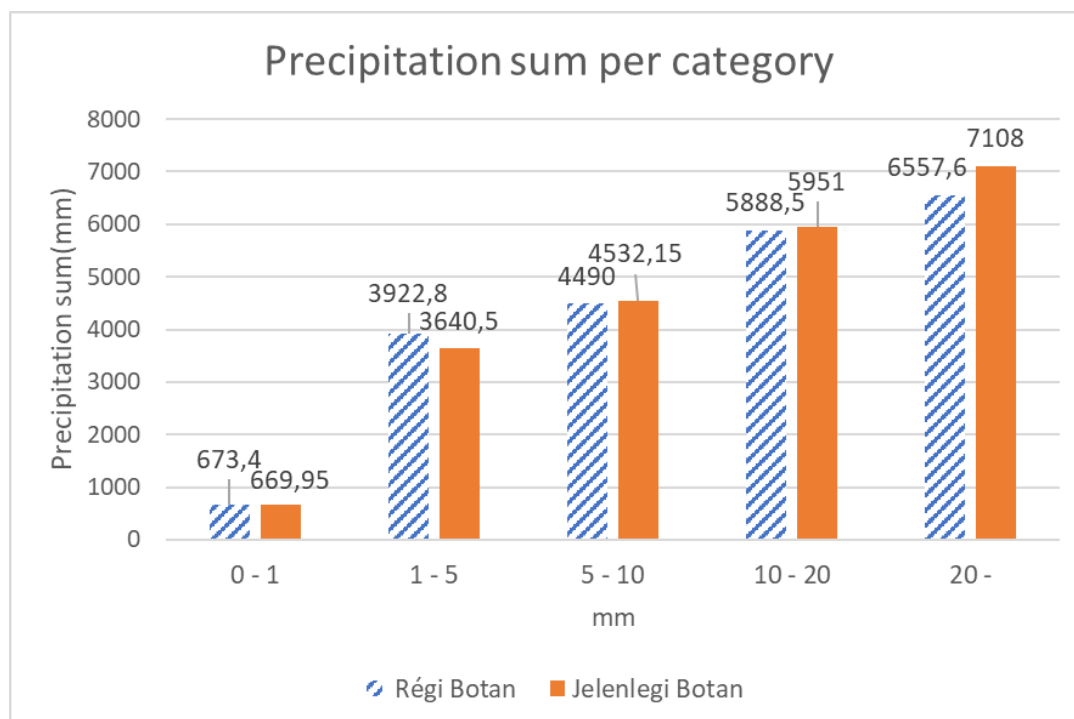


Figure 9: Comparison of precipitation amounts for 1930-1960 (blue) and 1989-2019 (orange) by category

It can be seen that in the current 30 years, there has been more heavy precipitation, so the category above 20 mm has a higher precipitation amount. However, more of the smaller precipitation (1-5 mm category) also occurred.. The increase in the frequency of large precipitation events (which are also generally of higher intensity) is negative from a forest hydrological point of view because it increases runoff and reduces the possibility of infiltration. Other researchers also predicted that the distribution of precipitation will become increasingly uneven, leading to more droughts in the future, even with constant or increasing rainfall. This could lead to decreased tree growth and increased mortality (Somogyi, 2018).

We also performed a significance test with 95% confidence intervals for the annual mean temperature and precipitation data for the two chosen periods of the botanical garden station. The results show that only the annual mean temperature data series for 1989-2019 shows a significant difference (1,68°C/30 years).

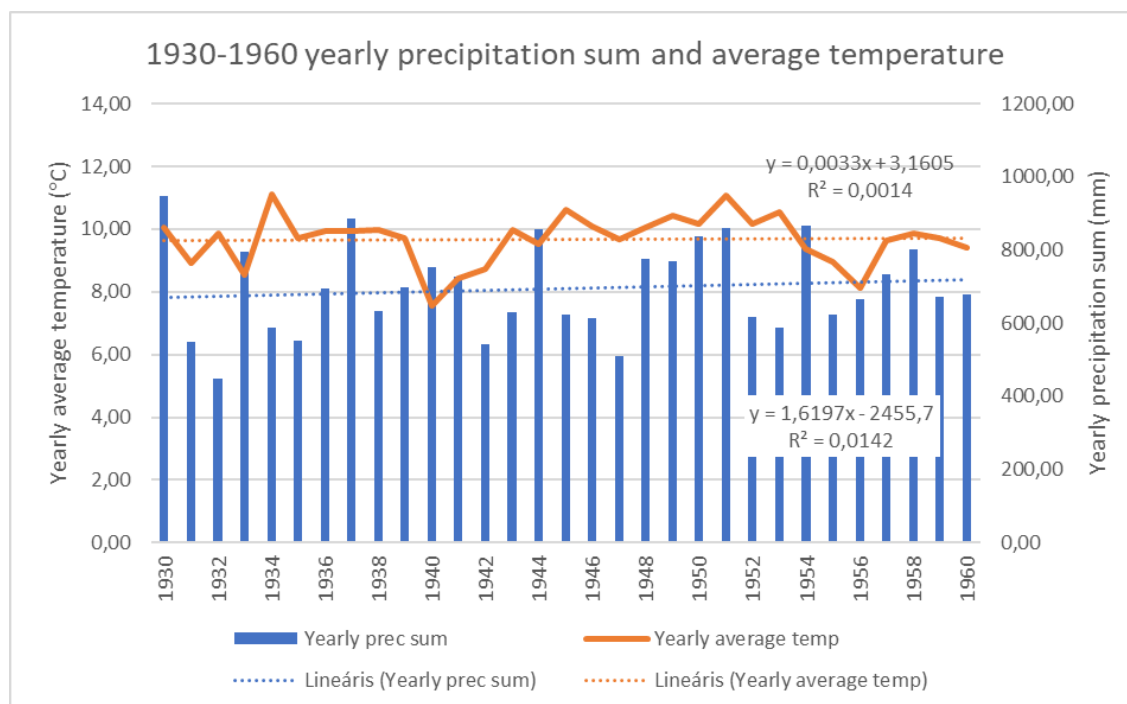


Figure 10: Yearly precipitation sum and average temperature of the Botanical garden from 1930 to 1960

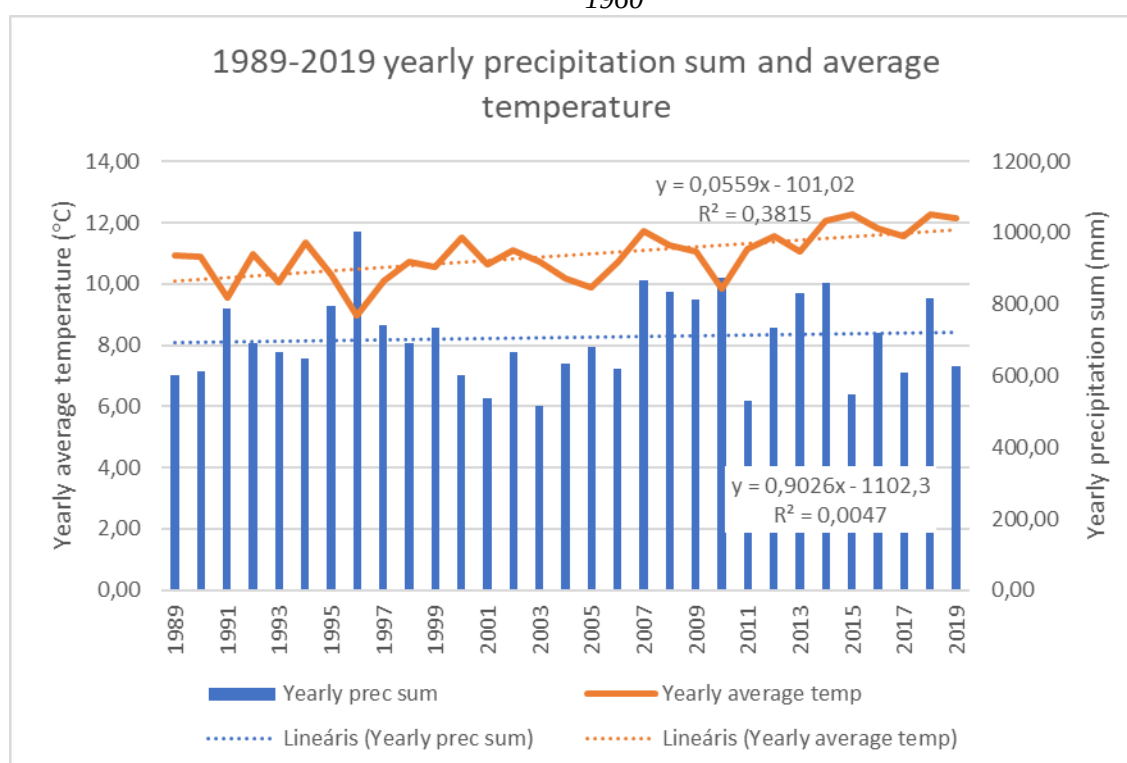


Figure 11: Yearly precipitation sum and average temperature of the Botanical garden from 1989 to 2019

Figures 10 and 11 illustrate how the temperature change over the past 30 years was compared to previous periods.

Next we analysed the FAI (Forestry Aridity Index) because, for climate assessment, it is necessary to use an indicator that takes into account the causal relationship between tree growth and climate, the

weather conditions of the periods that influence them, and builds on meteorological characteristics that have been recorded over a long period and in several locations, and that can be extended spatially and temporally, i.e. extrapolated with a high degree of confidence.

$$FAI = 100 * \frac{T_{average(VII-VIII)} [^{\circ}C]}{P_{V+VI+2*VII+VIII} [mm]}$$

where T average (VII-VIII) is the average temperature of the critical months (July, August), $P_{V+VI+2*VII+VIII}$ is the precipitation sum of the main growing season, where the precipitation of July with the hottest and the lowest humidity is double weighted. The average FAI indices calculated from the data and the zonal tree populations of the region were used to develop the climate categories, which are shown in Table 1. (Führer, 2010)

Table 1: FAI classification

Beech climate (B)	$FAI \leq 4,75$
Hornbeam oak climate (GYT)	$4,75 < FAI \leq 6,00$
Sessile oak/turkey oak climate (KTT/CS)	$6,00 < FAI \leq 7,25$
Forest-steppe climate (ESZTY)	$7,25 < FAI \leq 8,50$
Steppe climate (SZTY)	$8,50 < FAI$

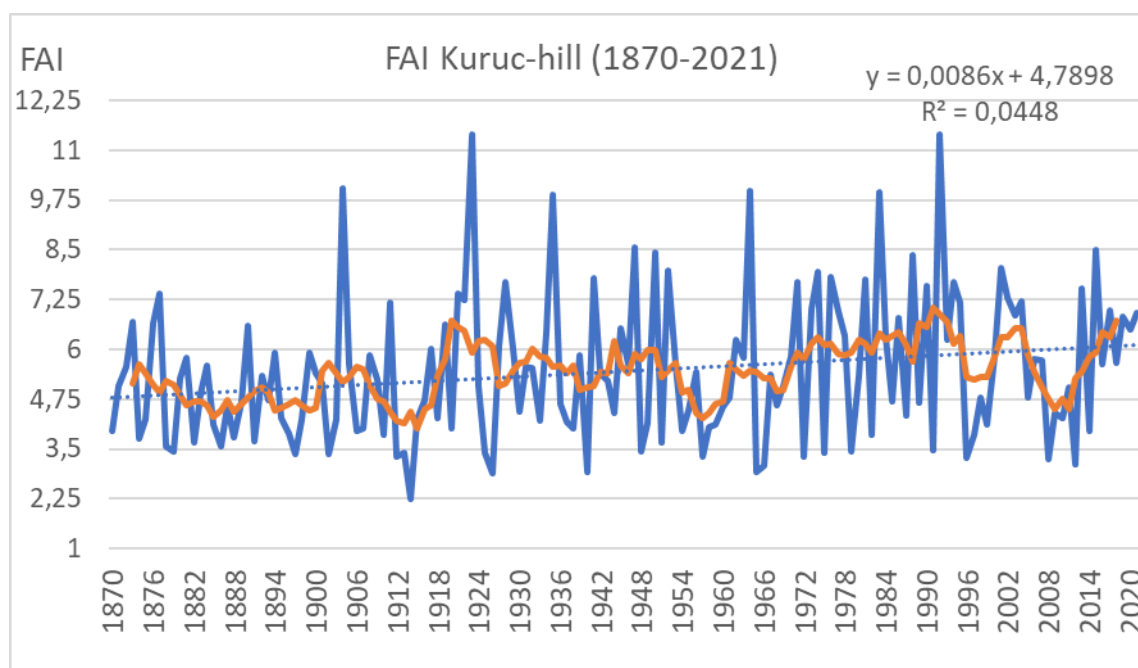


Figure 12: Kuruc-hill's FAI (Forestry aridity index) from 1870 to 2021

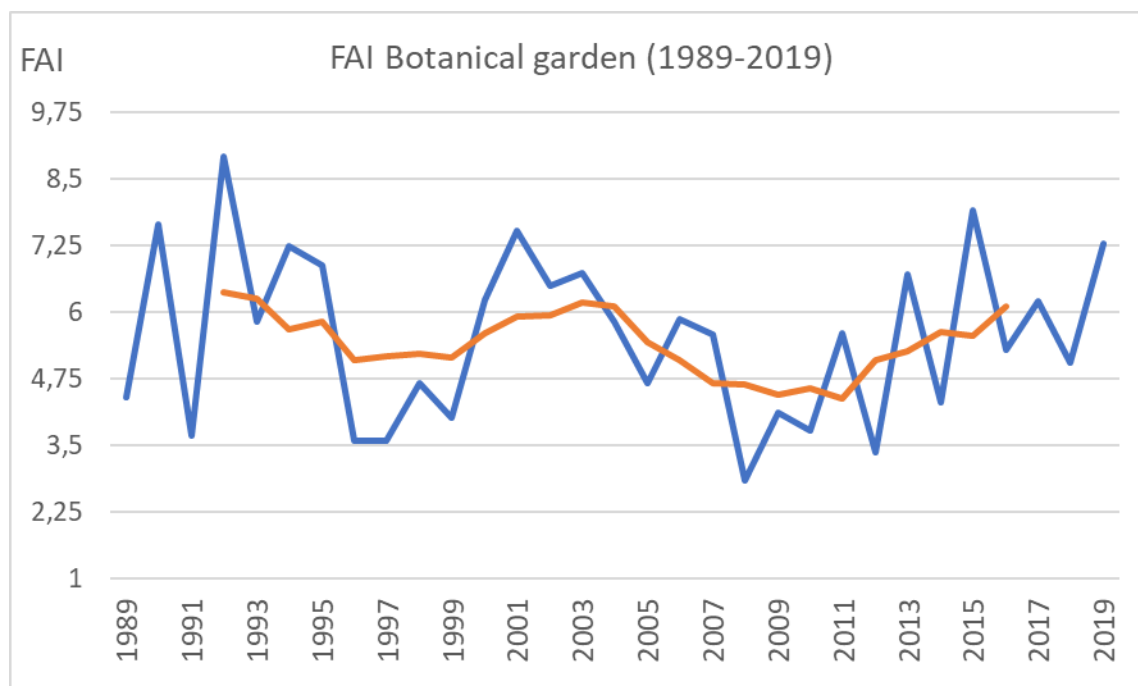


Figure 13: Botanical garden's FAI (Forestry Aridity Index) from 1989 to 2019

We calculated 7-year moving averages for the FAI diagrams because it is possible to see how much the FAI can vary after a consecutive year. So, averaging over 7 years gives a better overview of the changes over extended periods (Figure 12 and 13). At both stations, you can see how a drier, warmer year or a wetter, cooler year can cause a big jump in FAI. Even a single year with a high drought index can have serious consequences, as exemplified by the spruce dieback in the region. Spruce is a drought and drought-sensitive tree species (Varga, 2001), and drought events pose a greater risk of suckering to weakened tree species. (Lakatos, 1992) The number of years of mortality due to these and a large number of years of sanitary logging required in the region is very similar to years with high FAI values (when the average of 7 years reached the KTT climate of 6 or above), e.g. 1989-1993, 2001-2004, 2015-2019 (Andrési and Folcz, 2022). The trend line fitted to the diagram shows that the FAI is rising on the Kuruc hill, with the station now jumping one climate class on average compared to the 1870s. (It is now on the border between beech and hornbeam oak climate and hornbeam oak and sessile oak.)

6 Conclusion

We have created an improved database that can be used to create complex hydrometeorological analyses such as FAI, interception, evapotranspiration, snow development, water balance, analyzes from a forestry perspective (e.g., in connection with afforestation, tree species exchange during plant planning negotiations) The database was tested with different meteorological and hydrological analyses. Results show that temperatures have increased dramatically over the last 30 years compared to the 1930-1960 period (a significant amount)

The timing and intensity of precipitation have changed over the past decades, and temperatures have been steadily increasing. These could pose increasing problems for future forest management (Farágó et al., 1990). Therefore the tree species policy needs to be adapted even more to climate change and the increasing Mediterranean impacts (more drought-resistant tree species, interventions to increase forest resilience and water retention).

7 Literature:

- Andrési D., Á.Folcz, 2022: A Sopron környéki erdők egyes erdővédelmi problémái, Erdészeti lapok 157. évf. 12. sz. (2022. december) 462. page
- Csáki P., 2020: A klímaváltozás hatása a vízkészletekre a felszínborítás figyelembevételével, Doktori (PhD.) értekezés, Sopron, 122 pages
- Csáki, P., M.M.Szinetár, A.Herceg, P.Kalicz., Z.Gribovszki, 2018: Climate change impacts on the water balance - case studies in Hungarian watersheds. Időjárás 122 (1), 81–99. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2018.1.6>
- Dingman S., L., 2008: Physical Hydrology, Second Edition, Waveland Pr Inc, 656 pages
- Dowdy S., S.Wearden, 1983: Statistics for Research, John Wiley & Sons
- Faragó T.; Zs.Iványi; E.Führer; Z.Járó; T.Jászai.; G.Kovács; J.Mika; B.Nováky.; E.Nováky; I.Petrasovits; T.Práger; S.Szalai, 1990: Az éghajlat változékonysága és változása: okok, folyamatok, regionális hatások, különös tekintettel a lehetséges társadalmi-gazdasági következményekre, a nemzetközi együttműködésből adódó feladatokra, KTM – OMSZ, Budapest, 100 pages
- Führer E., 2010: A fák növekedése és a klíma. „KLÍMA-21” Füzetek 61: 98–107. pages
- Gálos B., E.Führer, 2018: A klíma erdészeti célú előrevetítése, Erdészettudományi Közlemények 8. évfolyam 1. szám, DOI: 10.17164/EK.2018.003 43-55. pages
- Hirka A., Z.Pödör, B.Garamszegi, Gy.Csóka, 2018: A magyarországi erdei aszálykárok fél évszázados trendjei (1962-2011), Erdészettudományi Közlemények, 8. évfolyam, 1. szám, 11-25. pages
- Karl, T.R., 1986: Relationship between decreased temperature range and precipitation trends in the United States and Canada, 1941-80. J.Climate Appl. Meteor. 25, 1878-1886.
- Lakatos F., 1992: A lucfenyő szűkártevői és a fák pusztulása. VEAB Értesítő 1992: 66-68. pages
- Pearson, K., 1948: Early Statistical Papers. Cambridge, England: University Press
- Sevruk B., 1982: Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 91.
- Somogyi Z., 2018: A klímaváltozás miatti fapusztulás tovább gyorsíthatja a klímaváltozást. Erdészettudományi Közlemények 8(1): 213–228. pages, DOI: 10.17164/EK.2018.013
- Thornthwaite, C.W., J.R.Mather, 1955: The water balance, Publications in Climatology, Centerton
- Varga F., 2001: Erdővédelemtan, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest

Klasifikácia a geomorfologický efekt priestorovej distribúcie zvyškov dreva (LWD) v koryte na príklade vodného toku Belá

Samuel Radič

Abstract

This thesis addresses the issue of the distribution of large woody debris and its influence on the morphological parameters of the channel in study segments of Belá stream, which is one of the last relatively preserved braided streams in the Western Carpathians. Spatial characteristics of large woody debris and in-stream structures of channel, captured by methods of Earth observation, were evaluated in seven time horizons (1973 – 2018). We evaluated the potential input of large woody debris to the channel and changes in channel morphology in the observed periods based on the comparison of the distribution of in-stream structures and their parameters in the two following time levels using the ArcMap 10.8.2 program. The development of the quantity of large woody debris in the channel is largely related to the prevailing hydrological conditions. The highest quantities of large woody debris in the channel were recorded in periods of extreme flood events, on the contrary, low quantities were recorded in periods without significant flood situations. The input of large woody debris to the channel of Belá stream is conditioned more by bank erosion than by island erosion. The ratio of eroded areas of the right and left banks of the stream is in balance, from which we conclude that the channel of Belá stream does not have a significant inclination to migrate in one direction. Based on the regression analysis, we found a certain linear dependence between the areas of large woody debris and the overall changes in the morphology of the stream channel, especially in periods without significant flood situations.

Anotácia

Táto práca sa zaoberá identifikáciou zvyškov dreva vo vybraných segmentoch toku Belá na základe dát diaľkového prieskumu Zeme. Zároveň sa pokúsime objasniť priestorové uloženie zvyškov dreva vo vzťahu k morfológii koryta a veľkosti prietoku.

Kľúčové slová: Distribúcia zvyškov dreva; hydrologické podmienky; morfológia koryta; Belá.

Annotation

This thesis addresses the identification of large woody debris in study segments of Belá stream by methods of Earth observation. We will also try to explain spatial location of large woody debris in relation to the channel morphology and the size of the flow.

Key words: Distribution of large woody debris; hydrological conditions; channel morphology; Belá stream.

1 Úvod

Nábor zvyškov dreva do koryta tokov je pozorovaný vo väčšine fluvialných systémov na Zemi. Pod pojmom zvyšky dreva rozumieme zvyšky kmeňov, vetiev, konárov a koreňov, ktoré sa vyskytujú samostatne alebo vytvárajú nahromadeniny (Lehotský a Grešková, 2004). Najčastejším predmetom výskumu je materiál s názvom large woody debris – LWD (veľké zvyšky dreva) (Grešková, 2005).

Primárnym zdrojom zvyškov dreva v prípade väčšiny vodných tokov je pobrežná zóna (Roni et al., 2015). Procesov vedúcich k náboru dreveného materiálu do riečneho systému je mnoho, pričom do určitej miery napovedajú o charaktere krajiny z pohľadu hydrológie, klímy, geomorfológie a ďalších charakteristík. Povodňové udalosti rôzneho typu sú schopné vyvolať nábor veľkého množstva dreveného materiálu vplyvom erózie brehov (Steeb et al., 2017). Medzi menej kontinuálne procesy, vyvolávajúce sporadické dodávky zvyškov dreva patria zosuvy svahov, pády lavín, výnimočné poveternostné podmienky (silný vietor, ťarcha snehu, námraza), činitele ovplyvňujúce vitalitu a stabilitu stromov (podkôrny a drevokazný hmyz, činnosť bobra, choroby, vek) (Bendix a Cowell, 2010). Nábor dreveného materiálu exponenciálne klesá so zvyšujúcou sa vzdialenosťou od koryta, pričom náborová vzdialenosť závisí najmä od druhu a veku stromov (Roni et al., 2015).

Transport a následné ukladanie zvyškov dreva ovplyvňujú vzájomné väzby režimu odtoku, morfológie koryta a parametrov zvyškov dreva v priestore a čase (Ruiz-Villanueva et al., 2016). Najvýznamnejšie hydrologické ukazovatele, od ktorých závisí mobilizácia a transport zvyškov dreva sú veľkosť a tvar čiar prietoku, trvanie zvýšeného prietoku, rýchlosť nárastu a následného poklesu prietoku, história povodňových udalostí. Najväčšia miera transportu dreva je pozorovaná pri povodňových udalostiach s rýchlym nástupom. Väčšina zvyškov dreva sa ukladá v okamihu dosiahnutia maximálneho prietoku. Na mobilizáciu a transport dreva má významný vplyv päť základných parametrov zvyškov dreva: ukotvenie, dĺžka, priemer, orientácia a druh pôvodného stromu. Vzťahy hydrologických pomerov a parametrov zvyškov dreva s mobilitou dreva sú do značnej miery variabilné. Značná časť tejto variability zrejme súvisí s parametrami koryta danej rieky a s jej záplavovým územím. Zvyšky dreva sa totiž počas povodňových udalostí prednostne ukladajú na miestach s drsnejším dnom koryta (Kramer a Wohl, 2017).

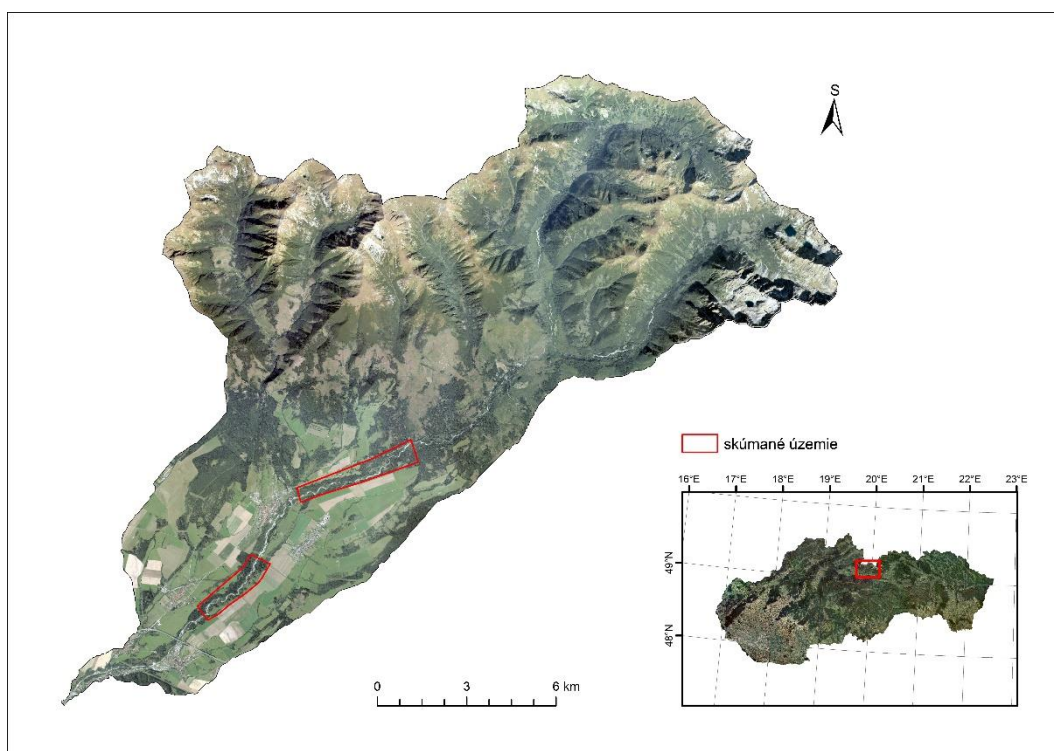
Miera vplyvu zvyškov dreva a ich akumulácií na morfológiu koryta závisí od množstva faktorov. Morfologické účinky riečneho dreva v koryte sa líšia v závislosti od veľkosti a sklonu vodného toku (Hogan a Luzi, 2010). Vplyv zvyškov dreva v menších horských tokoch je veľmi variabilný. Padnuté kmene stromov majú častokrát dostatočnú veľkosť na to, aby preklenuli celú šírku koryta bez toho, aby akokoľvek interagovali s vodným tokom (Marcus et al., 2002). Najväčší vplyv zvyškov dreva na morfológiu toku je pozorovaný najmä v menších alebo stredne veľkých aluviálnych tokoch s nižším sklonom (Baillie a Davies, 2010). V korytách riek vyššieho rádu je pomer najdlhších kusov dreva ku šírke koryta väčšinou zanedbateľný, teda môžeme predpokladať len obmedzené vplyvy zvyškov dreva v korytách veľkých riek (Krejčí, 2010).

Zvyšky dreva zvyšujú koeficient drsnosti koryta, spomaľujú prúdenie vody a vytvárajú miesta s nižšou energiou toku, čo vedie k zníženiu transportnej rýchlosti sedimentov, organického materiálu a ďalších splavenín (Bendix a Cowell, 2010; Krejčí, 2010; Marcus et al., 2002; Sear et al., 2010). Zároveň sú dôležitou ekologickou a fyzikálnou zložkou riečnych ekosystémov (Parsons a Thoms, 2007). Ich prítomnosť zvyšuje hydrologickú a morfologickú zložitosť toku, čím vznikajú biotopy s rôznymi podmienkami (Baillie a Davies, 2010).

2 Metodika

2.1 Zájmové územie

V rámci povodia rieky Belá sme si ako objekt výskumu zvolili dva segmenty toku (obr. 1). Najdôležitejším kritériom výberu bolo čo najpôvodnejšie územie bez významnejších antropogénnych vplyvov. Na základe vzájomnej polohy sme dané segmenty zadefinovali ako horný a dolný segment. Základom metodologických postupov bola identifikácia zvyškov dreva ako priestorových jednotiek v rámci zvolených segmentov a ich následná vektorizácia v programe ArcMap 10.8.2. Súčasťou postupov bolo aj spracovanie priestorových údajov aktívneho koryta Belej, ktoré nám poskytol Geografický ústav SAV.



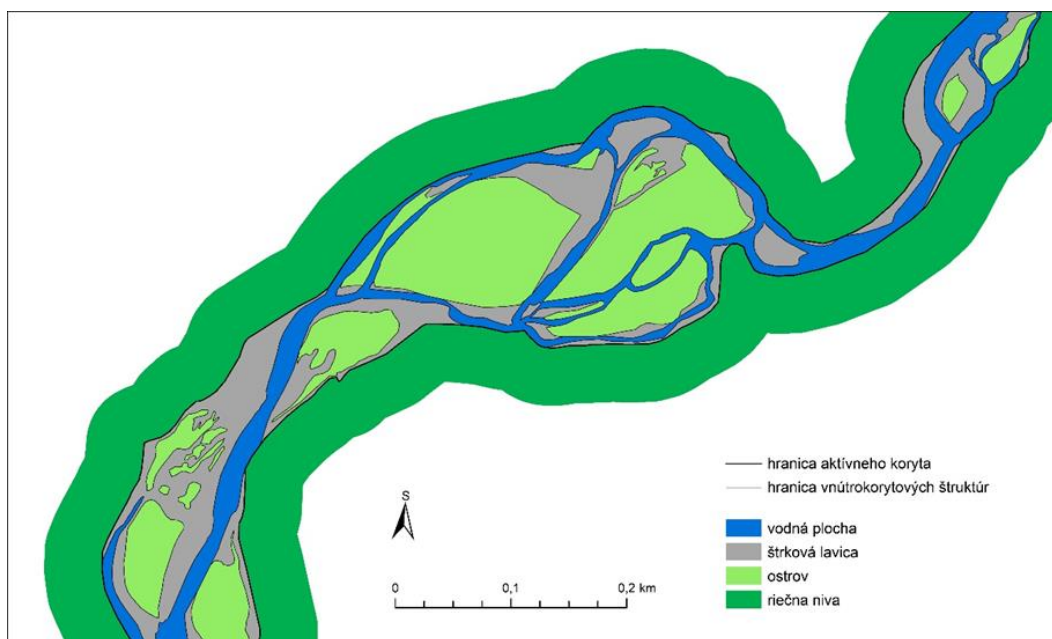
Obr. 1 Povodie rieky Belá a zájmové územie (Zdroj údajov: GKÚ Bratislava)

2.2 Získavanie a spracovávanie údajov

Zvyšky dreva boli vektorizované v siedmich časových horizontoch na základe leteckých meračských snímok (1973) a ortofotosnímok (2002, 2006, 2009, 2012, 2015, 2018). Letecké meračské snímky boli získané z Topografického ústavu plk. Jána Lipského a ortofotosnímky z EUROSENSE s.r.o. V prípade roku 2006 bol spracovaný len dolný segment toku z dôvodu nekvalitnej ortofotosnímky, zobrazujúcej horný segment. Použité letecké meračské snímky a ortofotosnímky mali v jednotlivých sledovaných časových horizontoch rôzne hodnoty rozlíšenia a taktiež aj rozdielny počet spektrálnych pásiem. Snímky z roku 1973 mali uspokojivú kvalitu, boli však vyhotovené len v jednom spektrálnom pásme. Tieto snímky teda bolo možné zobrazovať len v odtieňoch šedej farby. Ortofotosnímky z rokov 2002 a 2006 mali o niečo nižšie rozlíšenie, avšak ich súčasťou už boli 3 spektrálne pásma. Bolo teda možné vykonať farebnú syntézu, čím sme získali ortofotosnímkou v pravých farbách. V prípade rokov 2009, 2012, 2015 a 2018 sme disponovali ortofotosnímkami s vysokým rozlíšením a oproti ostatným rokům aj so štvrtým spektrálnym pásmom v blízkej infračervenej oblasti elektromagnetického spektra. Vďaka nemu bolo možné vytvoriť zobrazenie aj v

nepravých farbách. Zobrazenie ortofotosnímkov v nepravých farbách nám umožnilo lepšie odlíšiť zvyšky dreva od živej vegetácie.

Priestorové údaje aktívneho koryta Belej, ktoré nám poskytla SAV, pozostávali z troch základných vnútrokorytových štruktúr – vodná plocha, lavica, ostrov. Za hranice aktívneho koryta boli považované línie oddeľujúce vodný tok a štrkové lavice od brehovej vegetácie. Získané priestorové údaje aktívneho koryta sme následne doplnili o vektorové vrstvy reprezentujúce plochy mimo aktívneho koryta – riečna niva. Priestorové údaje koryta Belej, s ktorými sme ďalej pracovali, teda pozostávali zo štyroch kategórií plôch (obr. 2).

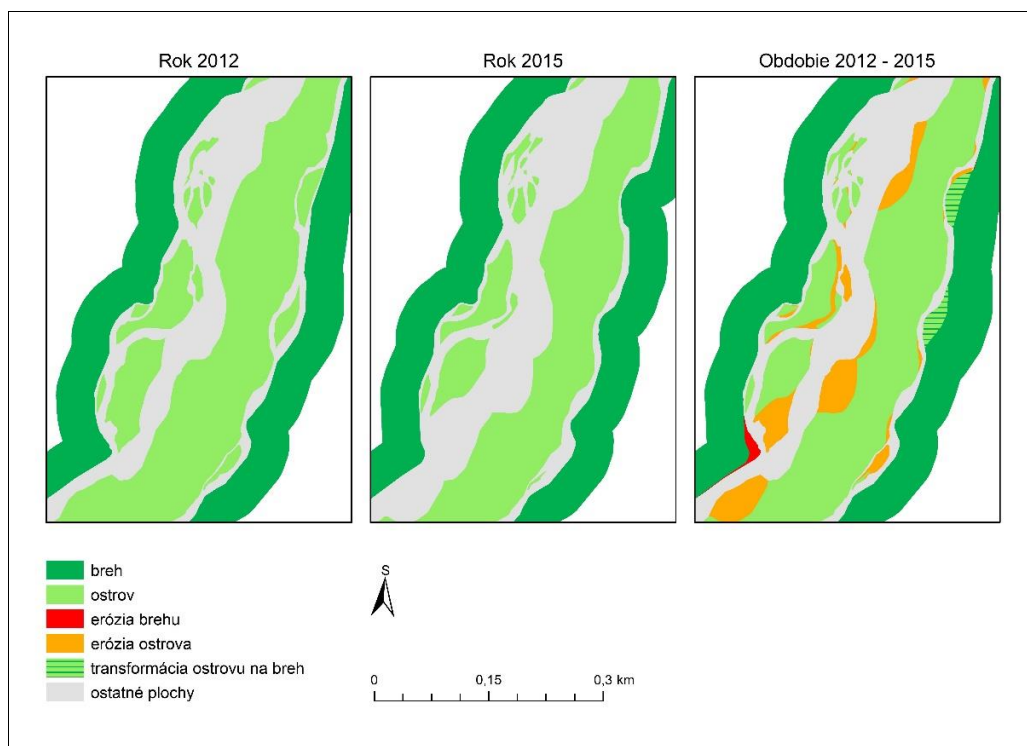


Obr. 2 Ukážka priestorových údajov koryta toku Belá

Na objasnenie vplyvu veľkosti prietoku na priestorové uloženie zvyškov dreva a morfológiu koryta sme použili údaje priemerných denných prietokov na rieke Belá v období rokov 2000 – 2021, zaznamenaných na vodomerných staniciach Liptovský Hrádok a Podolíne. Hydrologické údaje z období 2000 – 2009 a 2020 – 2021 nám poskytol SHMÚ, údaje z obdobia 2010 – 2019 nám poskytla SAV. Konkrétne nás zaujímal výskyt extrémnych povodňových udalostí, pod ktorými rozumieme priemerné denné prietoky (Q_d) na vodomernej stanici Liptovský Hrádok presahujúce hranicu $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Práve tieto prietoky výrazným spôsobom ovplyvňujú vnútrokorytové procesy skúmaného toku Belá (Kidová et al., 2016).

2.3 Prísun zvyškov dreva vplyvom erózie

Do akej miery podmieňuje prísun zvyškov dreva do koryta Belej erózia brehov alebo ostrovov sme zisťovali na základe vektorových vrstiev reprezentujúcich priestorové charakteristiky riečnej nivy a štruktúr aktívneho koryta. Kombinovali sme vektorové vrstvy dvoch časových horizontov (obr. 3) čoho výsledkom bola vektorová vrstva, na základe ktorej sme mohli analyzovať zmeny v polohe a štruktúre aktívneho koryta v danom období. Pri analýze sme sa sústredili výlučne na zmeny plôch zalesnených brehov a ostrovov, pričom sme sledovali ich transformáciu na iný typ štruktúry. Uvažovali sme, že vegetácia pokrývajúca tieto plochy je potenciálnym zdrojom zvyškov dreva. Za eróziu brehov a ostrovov sme považovali transformáciu týchto plôch na štrkové lavice alebo vodnú plochu. Transformáciu ostrova na breh a naopak sme nepovažovali za proces erózie, keďže v rámci týchto plôch nedošlo k žiadnym fyzickým zmenám. Celkovo sme vyhodnocovali zmeny v rámci piatich sledovaných období (2002 – 2006, 2006 – 2009, 2009 – 2012, 2012 – 2015, 2015 – 2018).



Obr. 3 Ukážka kombinácie vektorových vrstiev dvoch časových horizontov

2.4 Vplyv zvyškov dreva na morfológiu koryta

Súvis zmien morfológie koryta s priestorovým uložením zvyškov dreva v rámci sledovaného územia sme zisťovali pomocou vektorových vrstiev reprezentujúcich riečnu nivu a vnútrokorytové štruktúry aktívneho koryta Belej. Podobne ako pri identifikácii erózných plôch sme kombinovali vektorové vrstvy dvoch časových horizontov. Vzniknutú vrstvu sme následne rozdelili na 100 m dlhé riečne úseky. V rámci každého úseku sme identifikovali plochy, ktoré sa v priebehu sledovaných období pretransformovali na iný typ kategórie. Následne sme veľkosti týchto plôch porovnávali s veľkosťami plôch zvyškov dreva, pričom sme sa snažili zistiť, či existuje medzi týmito dvoma premennými závislosť. Predpokladáme, že zvyšky dreva majú najväčší vplyv na morfológiu koryta v obdobiach hydrologického pokoja, kedy ich dlhodobjšie zotrvanie na konkrétnom mieste nie je narušené vysokými prietokmi.

Na vyjadrenie závislosti oboch premenných sme použili regresnú analýzu v programe Excel. Použitá analýza je založená na porovnávaní dvoch vzájomne nezávislých premenných (X a Y). Pod premennými Y rozumieme vysvetľované hodnoty, pod premennými X rozumieme vysvetľujúce hodnoty (Goga a Bobáľová, 2017). V našom prípade sme považovali hodnoty plošného zastúpenia zvyškov dreva za vysvetľujúce (X) a veľkosti plôch so zaznamenanou zmenou kategórie za vysvetľované (Y). Výstupom analýzy bolo viacero štatistických ukazovateľov. Nás zaujímali výsledky korelačnej analýzy (Multiple R, R Square a P-value). Pre lepšiu interpretáciu výsledkov sme použili stupnicu hodnotenia korelačného koeficientu podľa Cohena (1988) (tab. 1).

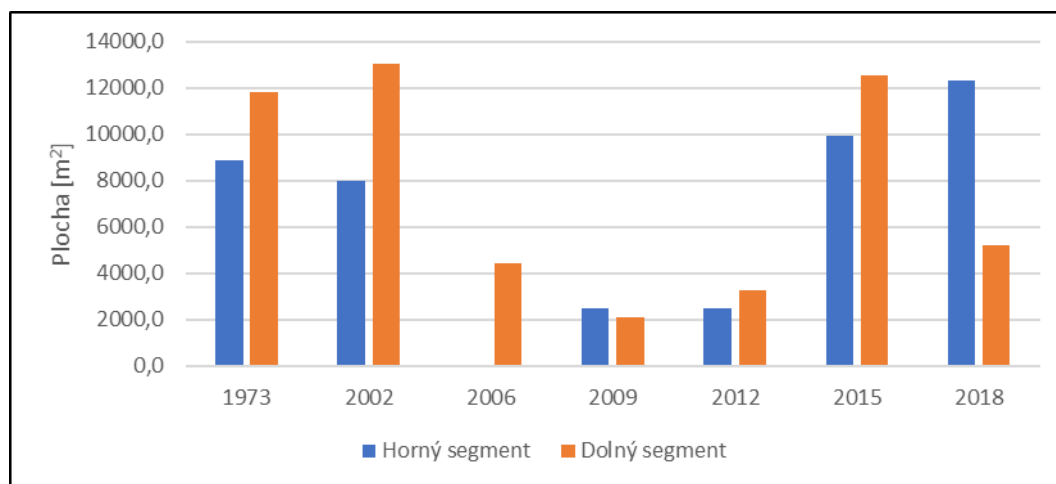
Tab. 1 Interpretácia korelačného koeficientu podľa Cohena (1988)

R (X, Y)	Interpretácia
0,0 – 0,1	triviálna korelácia
0,1 – 0,3	malá korelácia
0,3 – 0,5	stredná korelácia
0,5 – 0,7	veľká korelácia
0,7 – 0,9	veľmi veľká korelácia
0,9 – 1,0	takmer dokonalá korelácia

3 Výsledky

3.1 Množstvá zvyškov dreva v sledovanom období

Najväčšie množstvo zvyškov dreva s celkovým plošným zastúpením 22 494,2 m² sme zaznamenali v roku 2015. Naopak, najnižšie množstvo (4 582,8 m²) sme zaznamenali v roku 2009, pričom toto množstvo zodpovedá približne pätine celkového plošného zastúpenia zvyškov dreva v roku 2015 (obr. 4). Aj napriek väčšej dĺžke horného segmentu toku bolo v prípade štyroch sledovaných časových horizontov zistené väčšie množstvo zvyškov dreva v dolnom segmente.



Obr. 4 Plošné zastúpenie zvyškov dreva [m²] vo vybraných segmentoch rieky Belá v sledovaných časových horizontoch

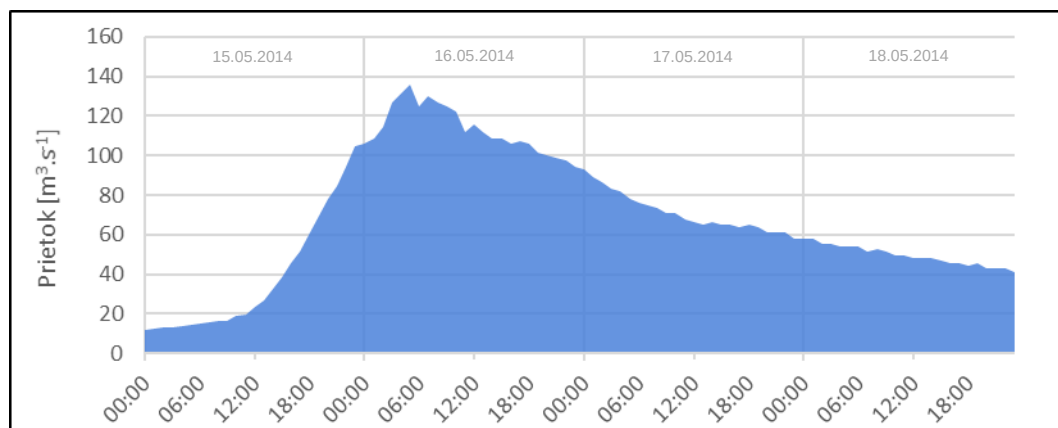
Plošné zastúpenie zvyškov dreva v jednotlivých časových horizontoch do určitej miery súvisí s prevládajúcimi hydrologickými podmienkami. Tab. 2 zobrazuje prehľad všetkých extrémnych povodňových udalostí na rieke Belá, zaznamenaných na vodomerných staniciach Liptovský Hrádok a Podbanské v období rokov 2000 – 2021.

Tab. 2 Výskyt extrémnych povodňových udalostí ($Q_d > 60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) na rieke Belá, zaznamenaných na vodomerných staniciach Liptovský Hrádok a Podbanské v období rokov 2000 – 2021

Rok	Dátum	$Q_d [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	
		Liptovský Hrádok	Podbanské
2010	04.06.	67,0	63,0
2014	16.05.	113,3	53,9
2018	19.07.	81,8	47,1
2020	23.06.	72,5	40,9
2021	01.09.	60,6	32,6

V roku 2002 bola celková rozloha zvyškov dreva v sledovaných segmentoch rieky Belá na úrovni okolo 21 000 m². Zistené množstvo zvyškov dreva pravdepodobne súvisí s povodňou, zaznamenanou na stanici Liptovský Hrádok dňa 25.7. 2001, kedy priemerný denný prietok dosiahol hodnotu takmer $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Obdobie rokov 2002 až 2009 môžeme hodnotiť ako hydrologicky pokojné, čo sa odrazilo aj na plošnom zastúpení zvyškov dreva. Ako môžeme vidieť na obr. 4, oproti roku 2002 došlo k celkovej redukcii plôch LWD o vyše 16 000 m². V období rokov 2009 – 2012 sa vyskytla jedna významnejšia povodňová udalosť, s ktorou zrejme súvisí aj mierny nárast plošného zastúpenia zvyškov dreva. V priebehu rokov 2012 – 2015 došlo k masívnemu nárastu plôch LWD o takmer 400 %. Tento nárast bol s vysokou pravdepodobnosťou spôsobený najvýznamnejšou povodňovou

udalosťou na rieke Belá v celom sledovanom období, ktorá sa odohrala v máji 2014. Priemerný hodinový prietok vody na stanici Liptovský Hrádok dosiahol hranicu $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 15. mája vo večerných hodinách, pričom pod túto hranicu sa dostal až 17. mája (taktiež vo večerných hodinách). Kulminácia bola zaznamenaná 16. mája ráno, kedy priemerný hodinový prietok dosahoval takmer $140 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 5). V období rokov 2015 až 2018 sa na rieke Belá vyskytla jedna významná povodňová udalosť. Jej vplyv na celkové plošné zastúpenie zvyškov dreva v roku 2018 je však otázný. Je totiž možné, že ortofotosnímka z roku 2018 vznikla ešte pred výskytom danej povodne. V prípade horného segmentu toku došlo oproti roku 2015 k miernemu navýšeniu plošného zastúpenia zvyškov dreva, naopak v rámci dolného segmentu došlo k výraznejšej redukcii. Od roku 2018 si zároveň môžeme všimnúť čoraz častejší výskyt extrémnych povodňových udalostí na rieke Belá.

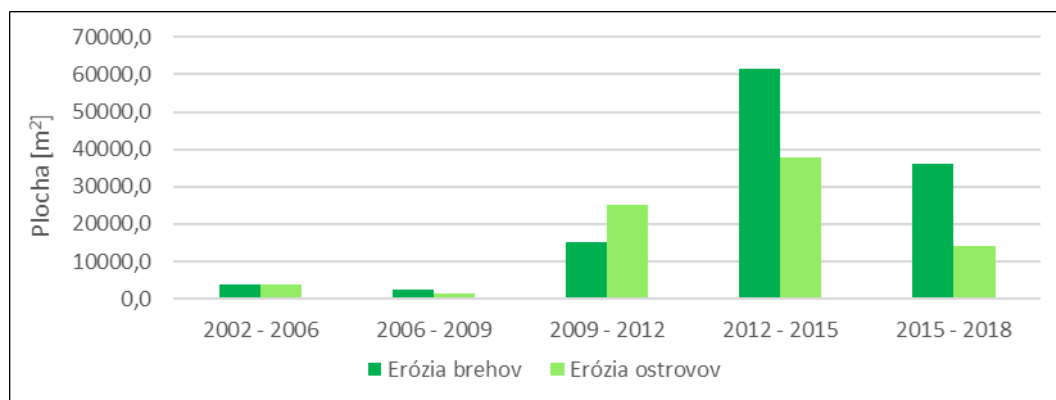


Obr. 5 Hydrogram toku Belá na stanici Liptovský Hrádok počas povodne v máji 2014

3.2 Prísun zvyškov dreva

Počas celého sledovaného obdobia (2002 – 2018) bolo oderodovaných $201\,397,3 \text{ m}^2$ plôch s vegetáciou. Väčší podiel na tom mala erózia brehov oproti erózii ostrovov v pomere 1,4:1. Z toho môžeme usúdiť, že prísun zvyškov dreva do koryta rieky Belá podmieňuje viac erózia brehov.

Proces erózie brehov a ostrovov do značnej miery závisí od hydrologických podmienok v povodí. Ako môžeme vidieť na obr. 6, v obdobiach rokov 2002 – 2006 a 2006 – 2009 bola oderodovaná len zanedbateľná časť plôch. Je to spôsobené predovšetkým tým, že v týchto obdobiach neboli zaznamenané významné povodňové udalosti. Zároveň nevidujeme zásadný rozdiel vo veľkosti oderodovanej plochy medzi brehmi a ostrovmi. V období 2009 – 2012 pozorujeme výraznejší nárast oderodovanej plochy oproti predošlým dvom obdobiám. Väčší podiel (vyše 60 %) na tom má erózia ostrovov. V ďalších dvoch obdobiach naopak dominuje erózia brehov oproti erózii ostrovov. V období rokov 2012 – 2015 sme zaznamenali najväčšie množstvo oderodovanej plochy v rámci celého sledovaného obdobia (takmer $100\,000 \text{ m}^2$). V ďalšom období (2015 – 2018) to bolo o polovicu menej, no stále ide o druhé najväčšie množstvo oderodovanej plochy za celé sledované obdobie.



Obr. 6 Porovnanie množstva oderodovaných plôch brehov a ostrovov v skúmaných úsekoch toku Belá v jednotlivých obdobiach

Pri vyhodnocovaní erózie brehov toku sme sledovali, či existujú rozdiely v množstve oderodovaných plôch pravého a ľavého brehu. Väčší podiel jednej zo strán na celkovej oderodovanej ploche brehov by znamenalo, že vodný tok Belá má tendenciu migrovať jedným zo smerov. Pri porovnaní celkového množstva oderodovaných plôch pravého a ľavého brehu sme nezistili takmer žiadne rozdiel. Pomer množstva oderodovaných plôch oboch strán brehov toku bol v celom sledovanom období (2002 – 2018) na úrovni takmer 1:1. Erózia brehov teda prebieha rovnomerne na oboch stranách toku. Na základe tohto zistenia možno považovať polohu aktívneho koryta Belej v posledných dvoch dekádach za stabilnú.

3.3 Vplyv zvyškov dreva na morfológiu koryta

Ako prvú sme zisťovali závislosť medzi plošným zastúpením zvyškov dreva (X) a veľkosťou plôch, kde došlo k zmene morfológie koryta (Y). Na základe regresnej analýzy sme v rámci štyroch sledovaných období zistili určitú lineárnu závislosť medzi premennými X a Y (tab. 3). Dokazujú to hodnoty dosiahnutej hladiny významnosti (P-hodnota), ktorými sme zamietli nulovú hypotézu tvrdiacu, že medzi danými premennými nie je lineárna závislosť. V prípade troch období bola zistená stredná korelácia medzi premennými X a Y. V období 2009 – 2012 bola zistená dokonca veľká korelácia, pričom hodnota koeficientu determinácie dosiahla hodnotu 0,254. Zmena premennej X v danom období teda ovplyvnila premennú Y na úrovni 25,4 %. Naopak v období rokov 2012 – 2015 sme nezaznamenali takmer žiadnu lineárnu závislosť.

Tab. 3 Lineárna závislosť medzi plošným zastúpením zvyškov dreva (X) a veľkosťou plôch, kde došlo k zmene morfológie koryta (Y)

Obdobie	Počet úsekov	Multiple R	R Square	P-hodnota
2002 – 2006	80	0,44	0,195	$4,23 \cdot 10^{-5}$
2006 – 2009	31	0,38	0,143	0,04
2009 – 2012	80	0,50	0,254	$1,86 \cdot 10^{-6}$
2012 – 2015	80	0,08	0,006	0,49
2015 – 2018	80	0,45	0,206	$2,36 \cdot 10^{-5}$

Podobné hodnoty lineárnej závislosti v jednotlivých obdobiach sme zaznamenali medzi plochami zvyškov dreva (X) a plochami transformovanými na ostrov (Y). V prípade období 2002 – 2006, 2009 – 2012 a 2015 – 2018 bola zistená stredná korelácia medzi premennými, v období 2006 – 2009 veľká korelácia (tab. 4). Naopak, takmer nulová lineárna závislosť bola zistená v období 2012 – 2015.

V tab. 5 môžeme vidieť, že určitá lineárna závislosť medzi plochami zvyškov dreva (X) a plochami transformovanými na štrkové lavice (Y) bola zistená vo všetkých sledovaných obdobiach. V rámci troch období bola zistená stredná korelácia, v obdobiach 2002 – 2006 a 2015 – 2018 malá

korelácia. V prípade posledného sledovaného obdobia však hodnota dosiahnutej hladiny významnosti (P-hodnota) ukázala, že daný model nie je štatisticky významný.

Tab. 4 Lineárna závislosť medzi plošným zastúpením zvyškov dreva a veľkosťou plôch transformovaných na ostrov.

Obdobie	Počet úsekov	Multiple R	R Square	P-hodnota
2002 – 2006	80	0,46	0,212	$1,70 \cdot 10^{-5}$
2006 – 2009	31	0,50	0,255	0,004
2009 – 2012	80	0,38	0,144	0,00
2012 – 2015	80	0,02	0,000	0,88
2015 – 2018	80	0,45	0,203	$2,72 \cdot 10^{-5}$

Tab. 5 Lineárna závislosť medzi plošným zastúpením zvyškov dreva a veľkosťou plôch transformovaných na štrkovú lavicu.

Obdobie	Počet úsekov	Multiple R	R Square	P-hodnota
2002 – 2006	80	0,26	0,068	0,02
2006 – 2009	31	0,39	0,153	0,03
2009 – 2012	80	0,44	0,190	$5,29 \cdot 10^{-5}$
2012 – 2015	80	0,33	0,108	0,003
2015 – 2018	80	0,12	0,014	0,29

Pri hľadaní lineárnej závislosti medzi plochami zvyškov dreva a jednotlivými premennými Y si vo všetkých prípadoch môžeme všimnúť určitú odlišnosť obdobia 2006 – 2009 oproti ostatným skúmaným obdobiam. Ide o výsledky dosiahnutých hladín významnosti (P-hodnoty), ktoré vo všetkých troch prípadoch aj napriek vyšším výsledným hodnotám korelačnej analýzy nevykazovali tak uspokojivé hodnoty, ako v prípade iných období s porovnateľnými výslednými hodnotami korelačnej analýzy. Je to spôsobené nižším počtom skúmaných úsekov, a teda aj nižším počtom vstupných premenných v regresnom modeli. V danom období sme totiž disponovali informáciami o plošnom zastúpení zvyškov dreva len v rámci dolného segmentu rieky Belá.

Výsledky regresnej analýzy závislosti oboch premenných sme následne dali do súvisu s prevládajúcimi hydrologickými podmienkami v sledovaných obdobiach. Určitá lineárna závislosť medzi plochami zvyškov dreva a celkovými zmenami v morfológii koryta bola zistená najmä v obdobiach bez výskytu významnejších povodňových udalostí (2002 – 2006, 2006 – 2009, 2015 – 2018). Takmer žiadna lineárna závislosť, zistená v období 2012 – 2015, s vysokou pravdepodobnosťou súvisí s výskytom extrémnej povodňovej udalosti v roku 2014. Naopak, najvyššia zaznamenaná lineárna závislosť bola zistená v období 2009 – 2012, a to aj napriek výskytu významnejšej povodňovej udalosti v roku 2010. Podobné hodnoty lineárnej závislosti v jednotlivých sledovaných obdobiach boli zistené aj medzi plochami zvyškov dreva a novovzniknutými ostrovnými plochami. Najvyššia lineárna závislosť však bola zaznamenaná v hydrologicky pokojnom období 2006 – 2009. Odlišné výsledky lineárnej závislosti v jednotlivých obdobiach môžeme pozorovať medzi plochami zvyškov dreva a novovzniknutými plochami štrkových lavíc. Lineárna závislosť medzi danými premennými bola zistená v obdobiach 2006 – 2015, teda aj v období výskytu extrémnej povodňovej udalosti v roku 2014. Malá alebo takmer žiadna lineárna závislosť bola zistená v obdobiach hydrologického pokoja (2002 – 2006, 2015 – 2018). Na základe výsledkov regresnej analýzy teda môžeme usúdiť, že zvyšky dreva majú o niečo väčší vplyv na zmeny vnútrokorytových štruktúr (najmä na tvorbu ostrovov) v obdobiach hydrologického pokoja. Naopak, vplyv na tvorbu štrkových lavíc sa zdá byť významnejší v obdobiach s výskytom extrémnych povodňových udalostí.

4 Záver

Na základe leteckých meračských snímok a ortofotosnímkov sa nám podarilo určiť plošné zastúpenie zvyškov dreva v rámci vybraných segmentov rieky Belá v siedmych časových horizontoch (1973 – 2018). Najväčšie množstvo zvyškov dreva sme zaznamenali v roku 2015, naopak, najnižšie množstvo v roku 2009, pričom toto množstvo zodpovedá približne pätine celkového plošného zastúpenia zvyškov dreva v roku 2015. Zistili sme, že zaznamenané množstvo zvyškov dreva v jednotlivých časových horizontoch do určitej miery súvisí s prevládajúcimi hydrologickými podmienkami. Najvyššie množstvá zvyškov dreva v koryte boli zaznamenané v obdobiach výskytu extrémnych povodňových udalostí, naopak, nízke množstvá v obdobiach bez výraznejších povodňových situácií.

Na základe analýzy zmien polohy a štruktúry aktívneho koryta v jednotlivých obdobiach sme zisťovali množstvo oderodovaných plôch brehov a ostrovov. V obdobiach rokov 2002 – 2006 a 2006 – 2009, počas ktorých nebola zaznamenaná výraznejšia povodňová udalosť, bola oderodovaná len zanedbateľná časť plôch brehov a ostrovov. Naopak v období rokov 2012 – 2015, kedy bola zaznamenaná najväčšia povodeň za posledné dve dekády, bolo oderodované najväčšie množstvo plôch brehov a ostrovov v rámci celého sledovaného obdobia. V období 2002 – 2018 bolo oderodovaných celkovo 201 397,3 m² plôch s vegetáciou. Väčší podiel na tom mala erózia brehov oproti erózii ostrovov, z čoho usudzujeme, že prísun zvyškov dreva do koryta rieky Belá podmieňuje viac erózia brehov. Pomer množstva oderodovaných plôch pravého a ľavého brehu v celom sledovanom období (2002 – 2018) bol na úrovni takmer 1:1, na základe čoho možno považovať polohu aktívneho koryta Belej v posledných dvoch dekádach za stabilnú.

Na základe štatistických metód sme analyzovali závislosť medzi plochami zvyškov dreva a zmenami v morfológii koryta. Určitú lineárnu závislosť medzi plochami zvyškov dreva a celkovými zmenami v morfológii koryta sme zistili najmä v obdobiach bez výskytu extrémnych povodňových udalostí (2002 – 2006, 2006 – 2009, 2015 – 2018). Naopak, takmer žiadnu lineárnu závislosť sme zistili v období 2012 – 2015, kedy sa vyskytla najvýznamnejšia povodňová udalosť v celom sledovanom období. Podobné hodnoty lineárnej závislosti v jednotlivých sledovaných obdobiach boli zistené aj medzi plochami zvyškov dreva a plochami transformovanými na ostrov. Odlišné výsledky lineárnej závislosti v jednotlivých obdobiach môžeme pozorovať medzi plochami zvyškov dreva a plochami transformovanými na štrkové lavice. Určitá lineárna závislosť medzi danými premennými bola zistená v obdobiach s výskytom extrémnych povodňových udalostí. Naopak, malá alebo takmer žiadna lineárna závislosť bola zistená v obdobiach bez výraznejších povodňových situácií. Z výsledkov teda usudzujeme, že zvyšky dreva majú o niečo väčší vplyv na morfológické parametre koryta (najmä na tvorbu ostrovov) v obdobiach bez výskytu významnejších povodňových situácií. Vplyv na tvorbu štrkových lavíc je naopak významnejší v obdobiach s výskytom extrémnych povodňových udalostí.

5 Zoznam použitej literatúry

BAILLIE, B. R., DAVIES, T. R., 2010. Influence of large woody debris on channel morphology in native forest and pine plantation streams in the Nelson region, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 36(4), 763-774. ISSN: 0028-8330.

BENDIX, J., COWELL, C. M., 2010. Fire, floods and woody debris: Interactions between biotic and geomorphic processes. *Geomorphology*, 116, 297-304.

COHEN, J., 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Lawrence Erlbaum Associates. 567 s. ISBN 0-8058-0283-5.

GOGA, T., BOBÁĽOVÁ, H., 2017. Matematické princípy regresnej analýzy v geografickej perspektíve. *Acta Geographica Universitatis Comenianae*, 61(2), 241-256.

GREŠKOVÁ, A., 2005. Zvyšky dreva v korytách riek: interakcie s korytovou morfológiou a fluvialnymi procesmi. *Geomorphologia Slovaca*, 5(1), 21-33.

HOGAN, D. L., LUZI, D. S., 2010. Channel Geomorphology: Fluvial Forms, Processes, and Forest Management Effects. In: PIKE, R. G., REDDING, T. E., MOORE, R. D., WINKLER, R. D., BLASON, K. D., Eds. *Compendium of Forest Hydrology and Geomorphology in British Columbia. Landscape Management Handbook* 66, 331-372.

KIDOVÁ, A., LEHOTSKÝ, M., RUSNÁK, M., 2016. Morfologické zmeny a manažment divočiaco-migrujúceho vodného toku Belá. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 16(2), 1-60. ISSN 1337-6799.

KRAMER, N., WOHL, E., 2016. Rules of the road: A qualitative and quantitative synthesis of large wood transport through drainage networks. *Geomorphology*, 279, 74-97.

KREJČÍ, L., 2010. Struktura, dynamika a geomorfologické účinky dřevní hmoty v korytech vodních toků lesních vegetačních stupňů ČR [Dizertačná práce]. Masarykova univerzita. Přírodovědecká fakulta. Vedúci práce: Mgr. Zdeněk MÁČKA, Ph.D. Brno, 224 s.

LEHOTSKÝ, M., GREŠKOVÁ, A., 2004. Hydromorfologický slovník (Slovensko – anglický výkladový slovník hydromorfologických termínov) [online]. Slovenský hydrometeorologický ústav. Bratislava, 77 s. [cit. 2024-10-22]. Dostupné na: https://www.shmu.sk/File/implementacia_rsv/slovnik/slovnfinal.pdf

MARCUS, W. A., MARSTON, R. A., COLVARD Jr., C. R., GRAY, R. D., 2002. Mapping the spatial and temporal distributions of woody debris in streams of the Greater Yellowstone Ecosystem, USA. *Geomorphology*, 44, 323-335.

PARSONS, M., THOMS, M. C., 2007. Hierarchical patterns of physical–biological associations in river ecosystems. *Geomorphology*, 89, 127-146.

RONI, P., BEECHIE, T., PESS, G., HANSON, K., 2015. Wood placement in river restoration: fact, fiction, and future direction. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 72, 466-478.

RUIZ-VILLANUEVA, V., WYŻGA, B., ZAWIEJSKA, J., HAJDUKIEWICZ, M., STOFFEL, M., 2016. Factors controlling large-wood transport in a mountain river. *Geomorphology*, 272, 21-31.

SEAR, D. A., MILLINGTON, C. E., KITTS, D. R., JEFFRIES, R., 2010. Logjam controls on channel:floodplain interactions in wooded catchments and their role in the formation of multi-channel patterns. *Geomorphology*, 116, 305-319.

STEEB, N., RICKENMANN, D., BADOUX, A., RICKLI, C., WALDNER, P., 2017. Large wood recruitment processes and transported volumes in Swiss mountain streams during the extreme flood of August 2005. *Geomorphology*, 279, 112-127.

Vliv evidovaného antropogenního ovlivnění na vodnost řeky Svratky ve stanici Židlochovice za referenční období 1990-2020

Influence of recorded anthropogenic forcing on the water level of the Svratka River at the station Židlochovice for the reference period 1990-2020

Mgr. Barbora Špinarová¹, Mgr. Jiří Válek¹

¹*Český hydrometeorologický ústav*

Abstrakt

Příspěvek je zaměřen na vliv evidovaných antropogenních ovlivnění (odběrů a vypouštění vody) na vodnost řeky Svratky ve vodoměrné stanici Židlochovice s plochou povodí přesahující 3900 km². Ke zjištění vlivu evidovaných ovlivnění na vodnost ve vybrané stanici jsou použity nejnovější údaje o odběrech a vypouštěních vody za referenční období 1990-2020 (zahrnuto nové referenční období), které jsou evidované dle zákona o vodách (vodní zákon) č. 254/2001 Sb. Vodnost v řece Svratce je reprezentována průměrnými měsíčními průtoky za referenční období 1990-2020. Výsledky pro stanici Židlochovice ukázaly, že v této stanici je vliv evidovaných antropogenních ovlivnění na měřené průtoky minimální. V některých letech převažuje vypouštění vody a v některých zase převažují odběry vody. Na základě těchto poznatků bude potřeba realizovat další studie, například se zaměřením na jiné menší úseky povodí řeky Svratky, jako je horní úsek povodí v rámci stanice Dalečín. Nebo se případně zaměřit na stanice ležící na přítocích, jako jsou Bílovice nad Svitavou (Svitava) nebo Rychmanov (Litava) s cílem zjistit, jaké jsou poměry vypouštění a odběrů vody na celkovou vodnost v těchto stanicích a povodích.

Klíčová slova: *vypouštění, odběry (povrchové a podzemní), Svratka, stanice Židlochovice, referenční období 1990-2020*

Abstract

This paper focuses on the influence of recorded anthropogenic influences (water abstractions and discharges) on the water level of the Svratka River in the water gauging station Židlochovice with a catchment area exceeding 3900 km². The latest data on water abstractions and discharges for the reference period 1990-2020 (new reference period included), which are recorded according to the Water Act No. The results for the station Židlochovice showed that in this station the influence of the recorded anthropogenic influences on the measured flows is minimal. In some years water discharge prevails and in some years water abstraction prevails. On the basis of these findings, further studies will need to be carried out, for example focusing on other smaller sections of the Svratka catchment, such as the upper section of the catchment within the Dalečín station. Or, alternatively, focus on stations located on tributaries such as Bílovice nad Svitavou (Svitava) or Rychmanov (Litava) in order to find out what are the ratios of discharges and abstractions to total water availability in these stations and catchments.

Keywords: *discharges, abstractions (surface and groundwater), Svratka, Židlochovice station, reference period 1990-2020*

Úvod

Vodní toky jsou neodmyslitelnou součástí krajiny. Jejich přirozenost nicméně s postupně narůstajícím antropogenním vlivem mizí. V dnešní době je spousta vodních toků zregulovaných, což narušuje jejich přirozený vodní režim. Jedním z těchto zásahů je evidované antropogenní vypouštění a odběry objektů, vybudovaných v daném povodí.

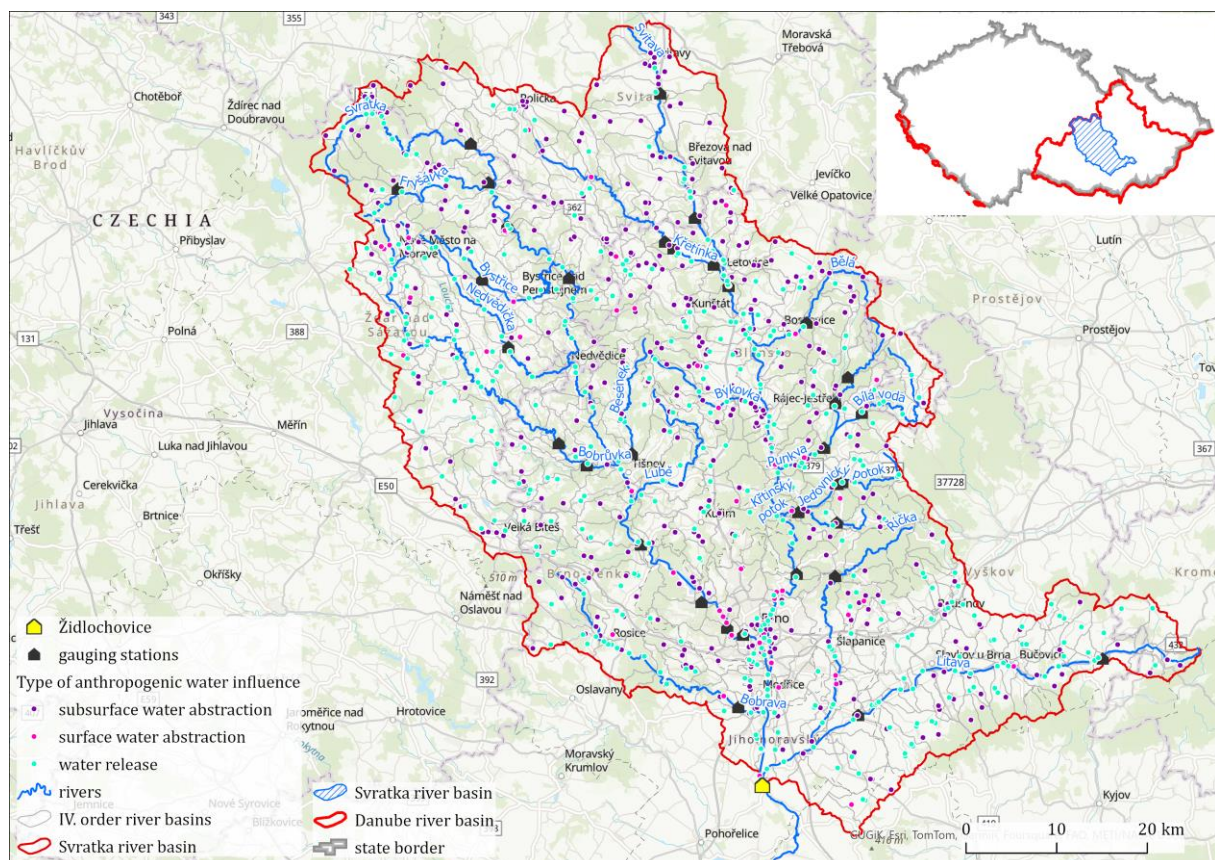
Problematikou se již zabývali Bárta a Boráková (2019). Jejich studie se zaměřovala na odběry a vypouštění vody v celém povodí Moravy, zahrnovala vliv přehrad na průtoky v řekách v suchém období 2014–2018 a procentuální vliv vypouštění na vodoměrných stanicích páteřních toků. Studie od Herzog, Hellwig a Stahl (2023) je zase zaměřená na výzkum řeky Dreisam na jihu Německa. Cílem této studie bylo analyzovat, jak se mění podélná a vertikální konektivita údolí řeky v souvislosti s klimatickými výkyvy v doplňování zásob podzemní vody a antropogenními odběry vody z hydrologického systému. Naše studie se zaměřuje na vliv odběrů a vypouštění v povodí jedné konkrétní stanice ležící na vodním toku Svratka (obr. 1).

Řeka Svratka odvodňuje Žďárské vrchy a přitéká na území Jihomoravského kraje severně od Tišnova. Téměř po celou dobu teče jihovýchodním směrem a na toku jsou vybudované dvě vodní nádrže – Vířská a Brněnská. Na území města Brno zleva přijímá svůj největší přítok řeku Svitavu. V povodí Svitavy na řece Křetínce stojí vodní nádrž Letovice pro nadlepšování průtoků řeky Svitavy, jako kompenzace ochuzení způsobené odběry Brezovského vodovodu. Dále teče Svratka dyjsko-svrateckým úvalem převážně jižním směrem a u závěrové stanice Židlochovice pojímá zleva svůj druhý největší přítok – Litavu. Plocha povodí Svratky činí v závěrové stanici 3 938 km², celková délka toku činí 173,9 km. Specifický odtok je největší v povodí horní Svratky a klesá směrem k povodí dolní Svratky (ČERMÁK 1950, VLČEK 1984, Hydrologické poměry ČSR).

Geologické poměry povodí Svratky jsou velmi pestré a zahrnují v sobě jak nejstarší, tak i nejmladší geologické útvary. Z hlediska odtoku povrchovým vod je celý Český masiv tvořen nepropustnými horninami, kde jen zvětřalá, málo mocná povrchová vrstva je propustná. Proto je povrchový odtok rychlejší než na propustném podloží. Horniny v povodí Svitavy jsou naopak propustné pro povrchovou vodu, v důsledku čehož má Svitava z celého povodí nejmenší rozdíl mezi malými a velkými vodami, tyto horniny jsou zároveň příčinou mírnění kulminačních průtoků (ČERMÁK 1950, VLČEK 1984, Hydrologické poměry ČSR).

Průměrný roční úhrn srážek v povodí Svratky se pohybuje v rozmezí 450–900 mm, nejvyšší úhrny jsou v oblasti Žďárských vrchů, dále množství srážek klesá směrem k jihu.

Na obr. 1 je znázorněno celé povodí Svratky, včetně jejích hlavních přítoků a vodoměrných stanic. Významnější z těchto stanic jsou zaznamenány v tab. 1 a jsou doplněny o své databankové číslo a velikost plochy povodí. Dále jsou na obr. 1 graficky znázorněny typy antropogenního ovlivnění vodních toků, a to povrchový a podpovrchový odběr vody a vypouštění. Každý z těchto subjektů je zahrnut do vyhodnocení celkového objemu ovlivnění v povodích IV. řádu (viz Výsledky).



Obr. 1 Říční síť vodoměrných stanic s vyznačením jednotlivých ovlivnění v povodí Svatky

Tab. 1 Přehled stanic ležící v povodí stanice Židlochovice

Stanice	**DBČ	tok	plocha povodí [km2]
Borovnice	441000	Svatka	128
Dalečín	442000	Svatka	367
Vír pod vyrovnávací nádrží	445000	Svatka	487
Veverská Bítýška	448000	Svatka	1480
*Židlochovice	462000	Svatka	3938
Rozhraní	452000	Svitava	228
Letovice	454000	Svitava	427
Bílovice nad Svitavou	457000	Svitava	1120
Skryje	446000	Bobruvka (Loučka)	222
Dolní Loučky	447000	Bobruvka (Loučka)	386
Brankovice	459000	Litava	72
Rychmanov	461000	Litava	496

*závěrová stanice

** databankové číslo vodoměrné stanice

Cílem tohoto příspěvku je lépe porozumět problematice odběrů a vypouštění na řece Svatce ve stanici Židlochovice. Tento postup lze následně aplikovat i na další významné vodní toky a jejich

vodoměrné stanice v rámci povodí Moravy. Tímto způsobem je možné vypořádat, zda velikost povodí hraje významnější roli v poměru mezi vypouštěním a odběrem vody.

Definice pojmů

Na začátek je potřeba uvést několik základních pojmů, které se v příspěvku budou objevovat. **ISPOP** je Integrovaný systém plnění ohlašovacích povinností, který zajišťuje příjem a zpracování vybraných hlášení z oblasti životního prostředí. Je zřízen dle § 4 odst. 1 zákona č. 25/2008 Sb., o integrovaném registru znečišťování životního prostředí a integrovaném systému plnění ohlašovacích povinností v oblasti životního prostředí a o změně některých zákonů ve znění pozdějších předpisů.

Povodí IV. řádu je nejmenší jednotkou, která vzniká rozdělením povodí III. řádu na menší celky. Obsahují i rozvodnice k profilům vodoměrných stanic.

Za **odběr** se považuje taková činnost, při které dochází k odebrání vody pro např. zemědělské nebo průmyslové účely. Odběr může být prováděn povrchovou formou přímo z vodních toků nebo také z podzemních vod.

Za **vypouštění** se považuje taková činnost, kdy dochází k vypouštění vod do řek či potoků. Typickým příkladem jsou kanalizace nebo čistírny odpadních vod.

Referenční období 1990-2020 je vybráno proto, že obsahuje nejnovější známé evidované údaje o odběrech a vypouštění vody do vodních toků v rámci všech povodí celé České republiky.

Odovlivněné průtoky jsou takové průtoky, které jsou očištěny od všech evidovaných odběrů a vypouštění vody.

Metody

Jedním z prvních kroků bylo získání údajů o vypouštění a odběrech vody. Tyto údaje pocházejí od podniku Povodí Moravy, s. p., který tyto údaje získává z databáze ISPOP dle zákona o vodách (vodní zákon) č. 254/2001 Sb. Do této evidence jsou zařazeny odběry povrchových a podzemních vod či vypouštění vod, jejichž povolené množství přesahuje 6000 m³/rok, případně 500 m³/měsíc a jejichž povolený objem povrchové vody akumulované či vzduté ve vodních nádržích přesahuje 1 000 000 m³. Subjekty s takovým povolením mají povinnosti jednou ročně hlásit naměřené údaje. Pro účely tohoto příspěvku jsme použili údaje o průměrných měsíčních sumách vypouštění a odběrů vody (v m³/s) daných subjektů. Sumy byly následně převedeny na jednu průměrnou hodnotu za celé referenční období 1990 - 2020. V prostředí ArcGIS Pro byla data zpracována pro konkrétní povodí IV. řádu tak, aby existovala konkrétní hodnota ovlivnění pro dané povodí. Pro vodnost ve stanici Židlochovice byly získány průměrné měsíční průtoky z databáze Hydrofond ČHMÚ, které budou sloužit dále k dalšímu zpracování s cílem vytvořit odovlivněné měsíční průtoky pro stanici Židlochovice.

Výsledky

Výsledná data vypouštění a odběrů vody nám ukazují, že ve stanici Židlochovice nepřevládá vypouštění nebo odběry vody, poměr mezi nimi je minimální. Dá se tedy říct, že co je z povodí odebráno, tak je do něj zase navraceno. Z celkového hlediska převládalo v letech 1990-2020 vypouštění vody, které je v mapě znázorněno kladnými hodnotami. Naopak odběry vody mají záporné hodnoty. V tabulkách 2. – 4. jsou uvedeny vždy 3 příklady významných objektů daného ovlivnění v povodí stanice Židlochovice. Jedná se o dodnes aktivní a fungující objekty. Hodnoty uvedené v tabulkách jsou průměrné hodnoty za celé zkoumané období, tedy za referenční období 1990-2020.

Mezi největší odběratele povrchové vody v povodí stanice Židlochovice jsou Brněnské vodárny a kanalizace (BVK) – Vodárenská soustava Vír (VN), Teplárny Brno – Špitálka nebo Teplárny Brno – výtopna Brno – sever (Maloměřice).

Tab. 2 Významní odběratele povrchové vody v povodí stanice Židlochovice

Název objektu	Průměrná hodnota za období 1990-2020 (m ³ /s)
Brněnské vodárny a kanalizace (BVK) - Vodárenská soustava Vír (VN)	0,074
Teplárny Brno - Špitálka	0,037
Teplárny Brno - výtopna Brno-sever (Maloměřice)	0,016

Mezi největší odběratele podzemní vody jsou Brněnské vodárny a kanalizace (BVK) – II. Březovský vodovod. Brněnské vodárny a kanalizace (BVK) – I. Březovský vodovod nebo Vodárenská Svitavy – Svitavy, Čtyřicet Lánů.

Tab. 3 Významní odběratele podzemní vody v povodí stanice Židlochovice

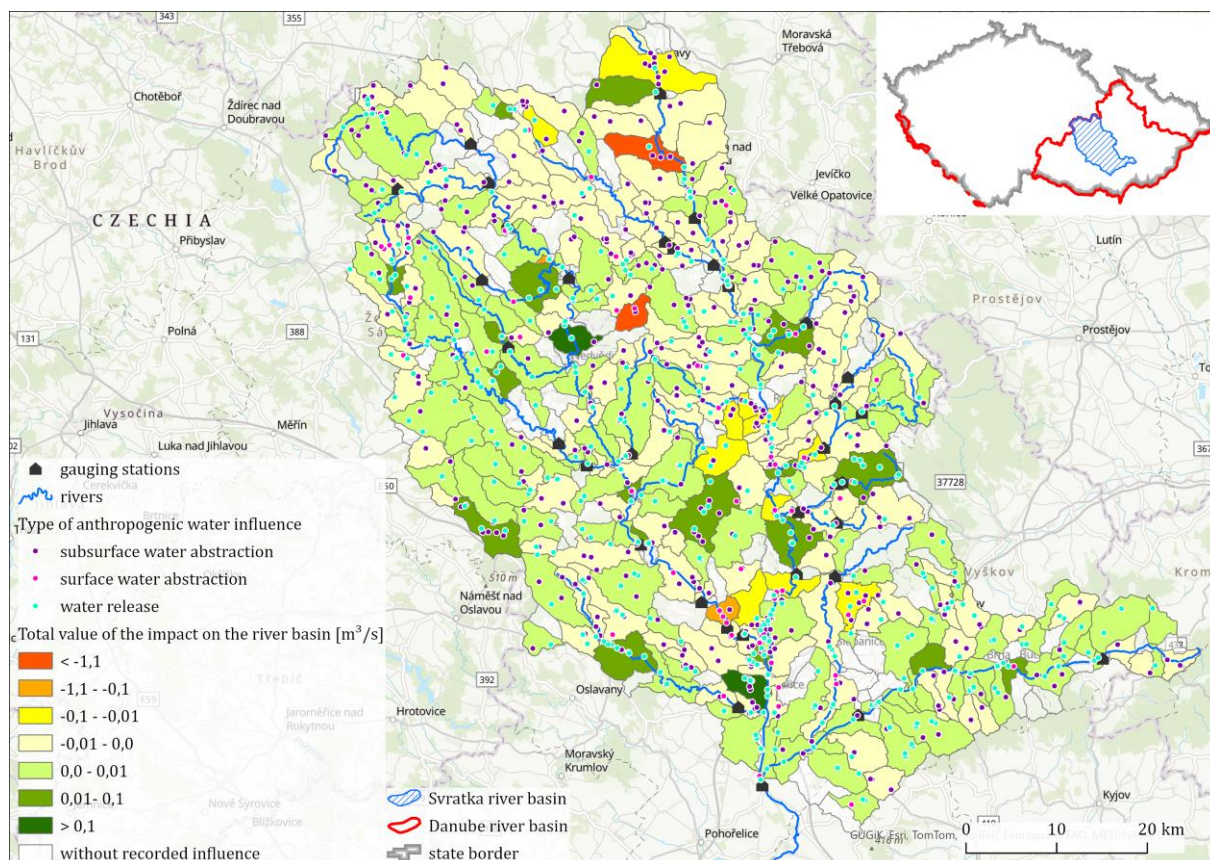
Název objektu	Průměrná hodnota za období 1990-2020 (m ³ /s)
Brněnské vodárny a kanalizace (BVK) Brno - II. Březovský vodovod	0,698
Brněnské vodárny a kanalizace (BVK) Brno - I. Březovský vodovod	0,487
Vodárenská Svitavy - Svitavy, Čtyřicet Lánů	0,03

Mezi největší objekty vypouštějící vodu se řadí Brněnské vodárny a kanalizace (BVK) – čistírna odpadních vod (ČOV) Brno-Modřice, Vodárenská Svitavy – ČOV Svitava nebo DIAMO GEAM – Rožná (DS R1).

Tab. 4: Významné objekty vypouštějící vodu do vodních toků v povodí Židlochovice

Název objektu	Průměrná hodnota za období 1990-2020 (m ³ /s)
Brněnské vodárny a kanalizace (BVK) Brno - ČOV Brno (Modřice)	1,251
Vodárenská Svitavy - Svitavy ČOV	0,056
DIAMO GEAM - Rožná (DS R1)	0,04

Na obr. 2 je graficky znázorněna celková suma ovlivnění v povodích IV. řádu v celém povodí Svatky. Tato hodnota je vypočtena jako součet, resp. rozdíl všech subjektů ovlivňujících průtok, které na dané povodí vstupují. Od toho je následně určena barva polygonu podle toho, do které kategorie daná hodnota spadá. Tímto způsobem je možné snadno rozeznat, ve kterém povodí převládá odběr vody (ať už povrchový či podpovrchový), a kde naopak vypouštění vod. Například povodí Rozsečského potoka a povodí Svitavy mají záporné hodnoty ovlivnění, dominuje zde tedy odběr vody. V povodí Svitavy je největším odběratelem podzemní vody I. Březovský vodovod (jak již je uvedeno výše), v případě Rozsečského potoka je odebrána povrchová voda Pstruhařským střediskem Ujčov (z mapy lze ale také vidět, že zde na rozdíl od Svitavy není evidované žádné vypouštění). Naopak povodí, kde převládá vypouštění vod, jsou například povodí Svatky (tmavě zelená barva). Na horní části toku se jedná o povodí nad soutokem s Nedvědičkou a největší podíl na vypouštění zde má opět Pstruhařské středisko Ujčov. V druhém případě se jedná o povodí pod soutokem Svatky a Svitavy a je zde evidovaných šest vypouštění, z nichž nejvíce přispívá již zmiňovaná ČOV Brno v městské části Modřice (průměrně 1,25 m³/s). Výsledná hodnota ovlivnění závisí samozřejmě na tom, kolik subjektů se v daném povodí nachází.



Obr. 2 Celková hodnota ovlivnění počítaná pro jednotlivá povodí IV. řádu za referenční období 1990 - 2020 v povodí Svatky po stanici Židlochovice

Diskuze

Výsledky této studie tedy ukázaly, že v povodí stanice Židlochovice poměr mezi vypouštěním a odběry vody je pro tuto stanici téměř vyrovnaný. Výsledný vliv na stanici je tak zanedbatelný. Hlavním důvodem je celková velikost povodí stanice Židlochovice a také fakt, že se jedná o závěrovou stanici, do které již přitekly všechny významné přítoky. V tomto ohledu je žádoucí provést podobná měření na dalších stanicích ležících v povodí stanice Židlochovice, např. stanice Dalečín a Veverská Bytíška nebo stanice na přítocích, jako jsou stanice Bílovice nad Svitavou a Rozhraní na řece Svitavě, případně stanice Rychmanov na Litavě. Dá se předpokládat, že vzhledem ke klesající velikosti povodí daných stanic se bude vliv na průtoky projevovat daleko více než na stanice s větší plochou povodí. Ze získaných dat o evidovaném vypouštění a odběrech vody rovněž vyplývá ještě skutečnost, že mezi lety 1990 - 2004 v povodí převládaly spíše odběry vody. V následujících letech se trend mění a dominuje vypouštění vody. Důvodem je vstup České republiky do Evropské Unie a možnost využívat evropské peníze na výstavbu ČOV v obcích a městech. Od roku 2004 se počet zvýšil téměř o 50 % (MŽP, 2024).

Přesto, že data byla sbírána velmi pečlivě, nelze se vyhnout určitým limitacím. Příkladem jsou odběry vody pro tvorbu sněhové pokrývky k zimním sportovním účelům. Takto odebraná voda se díky vypařování přeměňuje na vodní páru a v podobě srážek může dopadnout na jiné povodí. Druhou možností je však do půdy. Dalším příkladem jsou vodní nádrže, popřípadě rybníky. Zadržovaná voda se hlavně v letních měsících vypařuje a stejně jako u prvního příkladu se jen těžko určuje, kolik vody bylo takto vypařeno z daného povodí a už se do něj nevrátilo. Dalším problémem je, že data nejsou v denních krocích. Nelze z nich odvodit křivky překročení, abychom zjistili průměrný režim těchto ovlivnění v rámci například roku.

Závěr

Přírozené neovlivněné průtoky se v našich podmínkách již téměř nevyskytují. Hodnoty naměřené na vodoměrných stanicích jsou tak už z větší či menší části ovlivněné antropogenními vlivy. Tato studie konkrétně přináší nové poznatky o antropogenním vlivu vypouštění a odběrů vody na vodnost řeky Svratky v povodí stanice Židlochovice. Výsledky ukazují, že jednotlivá povodí IV. řádu jsou ovlivněna odběrem nebo vypouštěním vody od menší než 0,01 m³/s po 1,1 m³/s (během hodnoceného období). Největší ovlivnění mohou tuto hodnotu i překročit. Při sečtení všech těchto ovlivnění pro závěrovou stanici Židlochovice vychází poměr vypouštění a odběrů vody jen velmi minimálně. Nelze tedy tvrdit, že by v povodí stanice Židlochovice významným způsobem převládalo kladné nebo záporné ovlivnění. Proto je důležité se zaměřit na ostatní stanice na řece Svratce (Veverská Bítýška, Dalečín), ale také na stanice přítoků Svratky, jako je Svitava (Bílovice nad Svitavou, Rozhraní), Litava (Rychmanov) nebo Bobrůvka (Dolní Loučky). Dalo by se takto odvodit, jaké části povodí stanice Židlochovice jsou důsledkem vyšších odběrů povrchové a podzemní vody ztrátové a které naopak získávají díky vyššímu vypouštění vody do vodních toků.

Přesto je ovlivnění, nejen pro povodí stanice Židlochovice, velmi zřetelné. Zjištěné výsledky navíc nemusejí úplně odpovídat realitě vzhledem k tomu, že v příspěvku nejsou zahrnuty další přírodní nebo antropogenní faktory. Patří mezi ně např. vsakování, výpar (především z vodních nádrží a rybníků), případně malé neevidované odběry nebo vypouštění vody. Určit reálnou hodnotu ovlivnění je mnohdy téměř nemožné.

Literatura

BÁRTA, B., BORÁKOVÁ, J.: Ovlivnění průtoků ve vybraných vodoměrných stanicích ČHMÚ aneb Co (ne)teče ve vodních tocích? In. ROŽNOVSKÝ, J., LITSCHMANN, T. Hospodaření s vodou v krajině, Třeboň 13. - 14.6. 2019, vydal Český hydrometeorologický ústav Praha, ISBN 978-80-87577-88-2

HERZOG, A., HELLWIG, J. and STAHL, K. (2023). An investigation of anthropogenic influences on hydrologic connectivity using stress tests. 10.5194/hess-2023-243.

ČERMÁK, M. (1950): Svratka: hydrologická studie. Krajský národní výbor, Brno, 88 s.

VLČEK, V. a kol.: Zeměpisný lexikon ČSR - Vodní toky a nádrže, 1984, Praha, 315 s.

Elektronické zdroje

Ministerstvo životního prostředí. Online. Dostupné z https://www.mzp.cz/cz/news_20240430_Dvacetilet-v-EU-prineslo-zasadni-zlepseni-zivotniho-prostredi [citováno dne 2024-10-25]

II. Sekcia mladých vodohospodárov

Utilizing Open-Source R Programming for Data Visualization in Climate-Resilient Stormwater Management

Ing. Raghad Awad

Annotation

This article investigates the impact of rainfall changes on stormwater management in an urban area in Slovakia using the Rational Method combined with R programming for detailed analysis. The study utilizes R for analyzing projected rainfall patterns, assessing their effect on stormwater runoff, and identifying overflow events. This paper assesses whether the current drainage capacity can handle typical weather conditions. Moreover, the analysis performed is crucial for understanding the baseline performance of the stormwater system and for detecting trends or anomalies that could perform design improvements and suggest targeted improvements.

Keywords: Rational Method , R , Drainage system , runoff , overflow

Annotácia

Tento článok skúma vplyv zmien zrážok na hospodárenie s dažďovou vodou v mestskej oblasti na Slovensku pomocou racionálnej metódy kombinovanej s programovaním R na podrobnú analýzu. Štúdia využíva R na analýzu predpokladaných modelov zrážok, hodnotenie ich vplyvu na odtok dažďovej vody a identifikáciu udalostí pretečenia. Tento príspevok hodnotí, či súčasná odtoková kapacita dokáže zvládnuť typické poveternostné podmienky. Okrem toho je vykonaná analýza kľúčová pre pochopenie základného výkonu systému dažďovej vody a pre zistenie trendov alebo anomálií, ktoré by mohli zlepšiť dizajn a navrhnuť cielené zlepšenia.

Kľúčové slová: Racionálna metóda , R , drenážny systém , odtok , pretečeniu

1 Introduction

One of the most urgent issues facing the world today is climate change, which has a profound effect on ecosystems, weather patterns, and infrastructure. Global climate patterns have significantly changed as a result of the increased concentration of greenhouse gases in the atmosphere, which is mostly caused by human activities like the burning of fossil fuels and deforestation. Changes in precipitation intensity and frequency have become especially concerning for urban areas among the many other consequences. Stormwater management systems are beginning to feel the strain of extreme rainfall events, protracted droughts, and erratic weather patterns. These systems were frequently built using historical climate conditions. Studies show that during the past 50 years, annual rainfall trends have significantly increased in some parts of the world. [[1] A global environmental concern in recent decades, climate change gave rise to the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Paris Agreement, which seek to ensure collective action to mitigate the effects of climate change and to promote sustainable development globally [2]. The average annual precipitation in Europe has reportedly increased by 10% to 40% in recent years, according to a number of studies [1]. While rainfall has decreased in the southern portion of Europe, this has been especially noticeable in the countries of northeastern and northwest Europe. Slovakia has seen months and years that have

alternated between being exceptionally wet and extremely dry over the past ten years. Even though there are enough water resources available, extreme weather events still happen. Extreme daily torrential rains, a common sign of climate change, have been happening more often in Slovakia over the past 15 years, causing serious environmental and financial harm [3]. Stormwater runoff rises with an increase in impermeable surfaces, which causes river channels to fill up faster during floods and periods of heavy rainfall. By collecting surface runoff in large profile storm drains or storm tanks, such consequences can be avoided. The purpose of this study is to evaluate the stormwater management system's performance over a three-year period in Levice. Specifically, the system's ability to manage daily runoff and prevent overflow events using R programming will be examined. This study assesses the system's ability to adapt to changing climatic conditions and extreme weather events.

2 Surface Runoff formation and the effects of urbanisation on urban drainage

The process of capturing a specific amount of rainfall water in a catchment as a result of hydrological processes is known as surface runoff generation. When precipitation falls on a natural surface in the natural world, some of the water evaporates and returns to the atmosphere through transpiration by plants, while some seeps through and turns into groundwater, and some runs off the surface. The relative proportions change throughout the storm depending on the surface's characteristics. (Surface runoff tends to rise with increasing ground saturation.) A river will probably receive both surface runoff and groundwater, but surface runoff gets there much more quickly. These processes are significantly impacted by the development of an urban area, which involves covering the ground with artificial surfaces. The man-made surfaces raise the ratio of surface runoff to infiltration, which raises the overall amount of water that reaches the river during or shortly after rain. Surface runoff moves through sewers and across hard surfaces more quickly than it does along natural streams and surfaces. As a result, the flow will arrive and disappear more quickly, resulting in a larger peak flow. It goes without saying that this makes the river more likely to suddenly flood. It significantly affects the quality of the water as well. Thus, higher and more abrupt peaks in river flow, the introduction of pollutants, and the requirement for artificial wastewater treatment are the general effects of urbanization on drainage. The study is conducted in the urbanized town of Levice, which is a part of the Vinohrady urban district. The chosen study area is depicted in Figure 1. It seems that this is an ideal location for precipitation to build up. The region of interest is located in the Danube Lowland's northeastern region. Within the town, the podlužianka stream and the Perec artificial canal run directly through its territory, which is part of the Hron river basin. The town is located in the hydrographically significant Hron basin, with an average yearly flow of 50 m³. The receiving watercourses Podlužianka, Teler, and Perec drain surface water in the vicinity of the larger area of interest. The region is categorized as warm in Slovakia; it is dry, has long sunny days, mild winters, and an average annual temperature of 9 to 10 °C. There is an average of 600 mm of precipitation and 464–484 mm of evaporation per year. The direction of the predominant wind is NW to W.

The region is located in the Danube basin, specifically in the Horon River. The runoff regime in the Hron is of the snow-rainfall type. November through February sees accumulation, while March and April see high water content and late autumn and early winter see a somewhat notable increase in water content. Runoff is not as important in this area as evaporation is. [4] The main goal of the study in Levice was to find a solution for the Vinohrady housing estate. The proposal for rainwater management is directly in the suggested location because the housing estate has a high concentration of green spaces and sloped terrain that causes surface runoff. There is currently only one sewer system in Levice that provides wastewater disposal. After the manholes were opened, a visual inspection was conducted to verify the flow within the manholes and to determine the precise connection between each individual street drain. Upon examination of the real state, no damage to pipes or manholes was discovered. The reinforced concrete pipes in the project area range in diameter from DN 300 to DN

800. An instrument called the LeicaViva GS15 GPS was used to measure the sewer manholes. Every sewer manhole in the project area was measured for location and elevation using a GPS instrument. Since the Estate is mostly impermeable, each street has a street drain to allow stormwater to be drained from the area. The development spans 117 326 m², of which 74 055.7 m² (63.12%) are composed of paved areas, including residential dwellings' roofs. [5] Using the rainwater drains and connections, stormwater from the surrounding residential buildings' roofs is transferred to the sewerage system. In the proper relief chamber, the stormwater is released. The levice WWTP at the Géna location is where wastewater that is released through the single sewer is disposed of. Ballast water is a major burden on the sewage network, as the diluted sewage water creates issues during the technological cleaning process. The Podlužianka River is the recipient of treated wastewater.

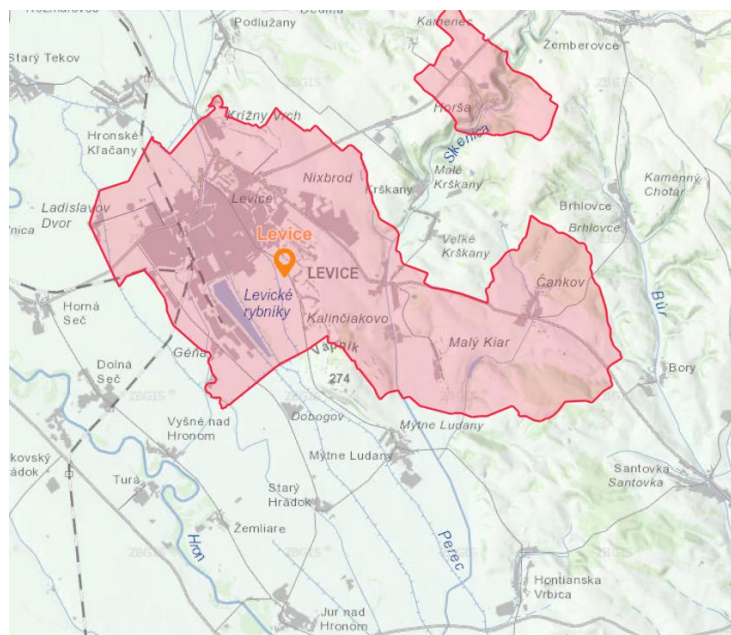


Figure 1: The location of the study area [6]

2.1 Choice of Surface Runoff calculation method

The magnitude and frequency of rainfall are unpredictable and cannot be known in advance, so drainage systems are designed by the general method illustrated in Figure 3. Design is accomplished by first choosing a suitable *design storm*. The physical properties of the storm contributing area must then be quantified. A number of methods of varying degrees of sophistication have been developed to estimate the runoff flows resulting from rainfall. In the correct choice of the surface runoff calculation method depends mainly on the type of task to be solved (sizing of the sewer network or determination of surface runoff). When selecting the method, it is also important to consider: availability of input data, size of the catchment, determine the level of protection of the catchment, objectives and level of outputs. Several globally recognised methods have been developed for the calculation of surface runoff:

- Design methods (Bartosek method and Rational method),
- Hydrogram methods,
- Empirical methods (isochron method, unit hydrograph method and others)
- and Deterministic models. [7]

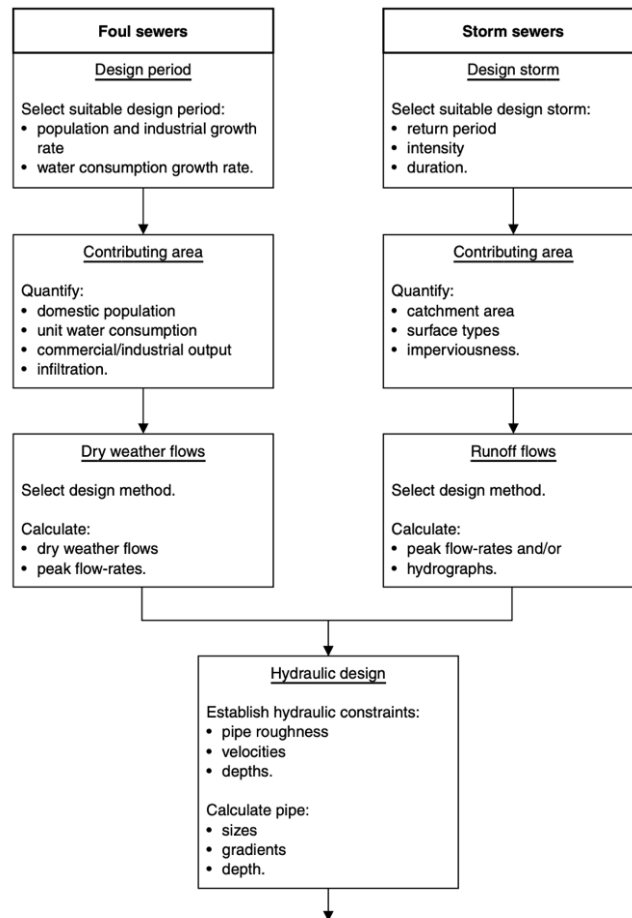


Figure 2: General method for the drainage system design [8]

3 Runoff Computation using Rational Method

The Rational Method has a long history dating back to the middle of the nineteenth century. The Irish engineer Mulvaney (1850) was probably the first to publish the principles on which the method is based, although Americans tend to credit Kuichling (1889) and the British credit Lloyd-Davies (1906) for the method itself. The method and its further development are described. The rational method is simple and widely used approach to estimate the peak discharge (maximum run off rate) from small drainage areas , typically for designing stormwater management systems.It provides a single peak flow value based on the assumption that rainfall intensity is uniform over the area and duration and not a hydrograph of flow against time.Hydrographs have been later developed to overcome this limitation and show the full runoff response .[8] The rational method is widely used and simple approach for estimating peak runoff in small urban catchments depending on the day stamp given for the precipitation. The formula 1 is used as explained earlier using Precipitation values for the 3-time period

$$Q = C.P.A \quad (1)$$

where Q is for the daily runoff measured volume of water in cubic metres C is the runoff coefficient which a value between 0 and 1 that depends on the surface type, representing the fraction of rainfall that becomes runoff. P is the daily precipitation, and the coefficient A stands for the catchment area in hectares. [9]

4 Data Visualisation using R

The study's main objective is to analyze stormwater runoff using three years' worth of observed rainfall data in order to provide an accurate picture of the system's performance. Rainfall data with hourly precipitation, which offers comprehensive information on rainfall patterns, including both brief, intense rain events and protracted wet periods, was one of the necessary data sets. Understanding the amount and intensity of rainfall that contributed to stormwater runoff is crucial. The rainfall data is imported into R using the readr package. Data cleaning is made easier by the dplyr package, which guarantees that all records are complete and consistent over time. The x t s package is used to transform the hourly precipitation data into a time series object, enabling temporal analysis of rainfall patterns. Significant rainfall events are classified according to their length and intensity using dplyr and lubridate. Storms with significant hourly rainfall are categorized as ones that are likely to produce significant runoff. The peak rainfall intensity (measured in millimetres per hour) is computed for every event. Estimating peak runoff and evaluating the stormwater system's reaction depend heavily on this value. The R environment displayed in figure 4 below was used to install the required library packages first and run the simulation. [10]

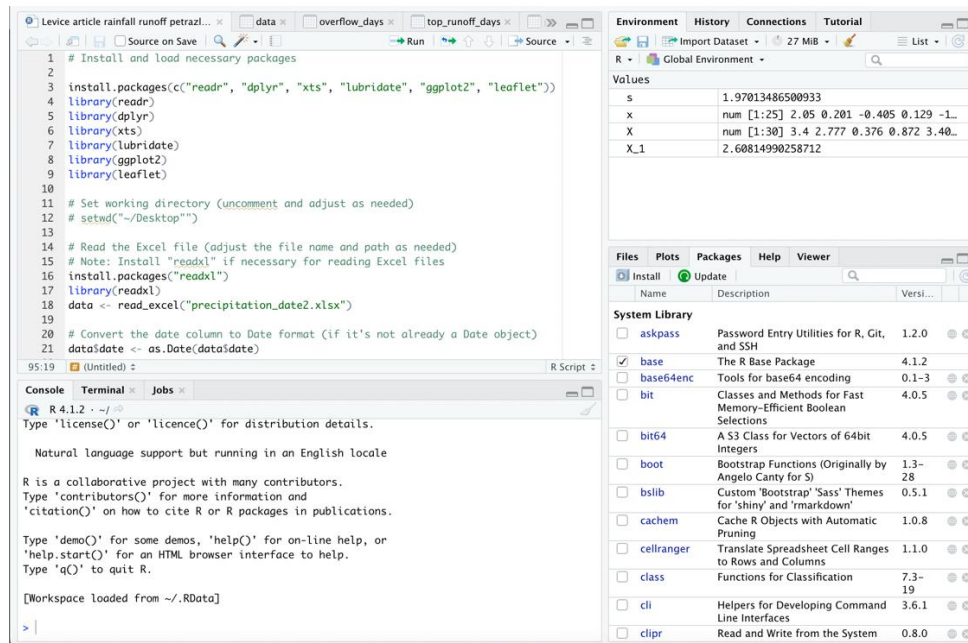


Figure 3: Appearance of R studio Environment and packages used

5 Coefficient Computation

To calculate the runoff coefficient for the catchment, first we need to determine the land use types based on whether it is impervious (pavements, rooftops, parking lots etc.), Residential areas (lawns, driveways and homes), Agricultural land (field, pasture, etc.) or Natural areas (forests and meadows). Then assigning runoff coefficient to each land use type; For each land use type assigning a typical runoff coefficient, the common values for runoff coefficient is classified in table 1. The third step would be to determine the area for each land use type in the catchment or study area. Then for an area that contains multiple land uses, one needs to calculate the weighted average of the runoff coefficient considering the area of each land type. The formulae for the composite runoff coefficient

$$C_{composite} = \frac{\sum(c_i \times A_i)}{\sum A_i}$$

(2)

; where C_i is the runoff coefficient for each land type and A_i is the area for each land use type. The area of the catchment is 11.7326 ha with 7.40557 ha has been identified as paved area with a runoff coefficient 0.7. Then we can compute the rest of unpaved area to be total area minus the paved area which was induced as 4.2944 ha. Hence the computed Runoff Coefficient for the entire catchment would be 0.18. Then, using the dplyr package on R studio the rational method is applied to each significant rainfall event. The formulae is used to calculate the peak runoff Q by multiplying the weighted runoff coefficient C , the peak rainfall intensity i , and the area A . [11]

Table 1: Typical Values of Runoff Coefficient in Urban areas

Area description	Runoff Coefficient	Surface Type	Runoff Coefficient
City centre	0.70 – 0.95	Asphalt and concrete paving	0.70–0.95
Suburban business	0.50 - 0.70	Roofs	0.75–0.95
Industrial	0.50 - 0.90	Lawns	0.05–0.35
Residential	0.30 - 0.70	Unpaved area-Forrest areas	0.05-0.25
Parks and gardens	0.05 - 0.30		

6 Daily Precipitation and Runoff

The daily precipitation and runoff were visualized using the R ggplot2 package. 11.7 hectares served as the simulation's catchment area. The five days with the highest runoff, indicated in Table 2, were induced from the time period of 1st of September 2022 to 30th September 2024. The total cumulative runoff for the entire period was estimated to be 31788.55 m³. The daily runoff was computed, and the precipitation and runoff were plotted in Figure 5 using the R code that follows. Figure 4 illustrates the graph used to plot runoff and precipitation versus date.

Table 2: 5 days with the highest runoff

	Date	Precipitation	Temperature	Runoff coefficient	Runoff m ³
1	2023-10-27	46.779	11.8	0.18	987.9107
2	2024-08-20	41.650	23.9	0.18	879.5930
3	2024-09-09	31.577	18.0	0.18	666.8646
4	2024-06-01	25.620	16.1	0.18	541.0606

5	2023-01-10	25.207	4.7	0.18	532.3386
---	------------	--------	-----	------	----------

The screenshot displays the R Studio environment. The script editor on the left contains the following R code:

```

26 # Define catchment area in hectares
27 catchment_area_ha <- 11.7326
28
29 # Calculate daily runoff in cubic meters
30 # Assuming your data contains a 'runoff_coefficient' and 'precipitation_mm' columns
31 data <- data %>%
32   mutate(runoff_m3 = runoff_coefficient * precipitation_mm * catchment_area_ha * 10)
33
34 # View the first few rows with calculated runoff
35 head(data)
36
37 # Create a plot of daily precipitation and runoff
38 ggplot(data, aes(x = date)) +
39   geom_bar(aes(y = precipitation_mm), stat = "identity", fill = "blue", alpha = 0.4) +
40   geom_line(aes(y = runoff_m3 / catchment_area_ha), color = "red", size = 1) + # Norm
41   labs(title = "Daily Precipitation and Runoff",
42        x = "Date",
43        y = "Precipitation (mm) / Runoff (m³ per hectare)") +
44   theme_minimal()
45
46 # Calculate total runoff over the period (in cubic meters)

```

The console on the bottom left shows the R startup message and workspace information. The package list on the right includes:

Name	Description	Versi...
askpass	Password Entry Utilities for R, Git, and SSH	1.2.0
base	The R Base Package	4.1.2
base64enc	Tools for base64 encoding	0.1-3
bit	Classes and Methods for Fast Memory-Efficient Boolean Selections	4.0.5
bit64	A S3 Class for Vectors of 64bit Integers	4.0.5
boot	Bootstrap Functions (Originally by Angelo Canty for S)	1.3-28
bslib	Custom 'Bootstrap' 'Sass' Themes for 'shiny' and 'rmarkdown'	0.5.1
cachem	Cache R Objects with Automatic Pruning	1.0.8
cellranger	Translate Spreadsheet Cell Ranges to Rows and Columns	1.1.0
class	Functions for Classification	7.3-19
cli	Helpers for Developing Command Line Interfaces	3.6.1
clipr	Read and Write from the System	0.8.0

Figure 4: calculating daily runoff and plotting the precipitation and runoff in R console

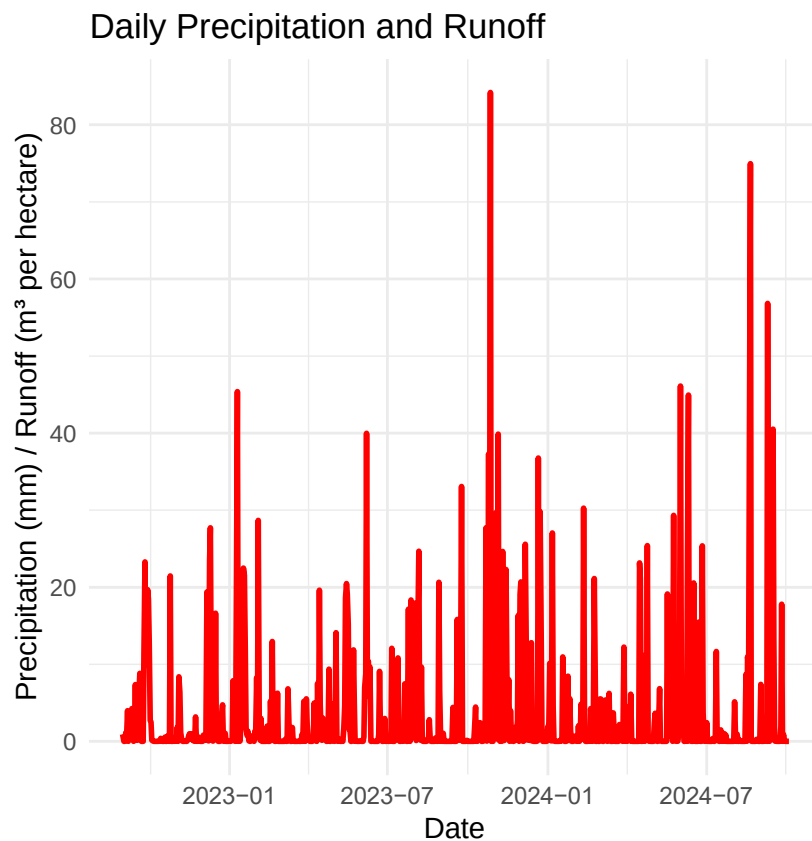


Figure 5: Precipitation and Runoff plot

7 Results and Discussion

This paper provides a reader with an overview of the possibilities that the R language offers when it comes to extending statistical analysis tools to create an application that presents spatial data. The use of the R language is an indisputable advantage of its statistical background with a wide range of powerful analytical tools, which means that within the application, it is possible to attach the results of statistical calculations in the form of graphs and histograms. After calculating the Runoff, analyzation of how rainfall impacts storm water management by examining factors like stormwater infrastructure capacity and system performance during extreme events. The stormwater system capacity for this catchment area was assumed to be 550 m^3 per day without flooding. This information has be used to compare against daily Runoff and determining overflow events. Identifying days exceeding stormwater capacity were also assessed indicating potential overflow or flooding. The number of days assessed with overflow were 3 with a total overflow volume of 884.3683 m^3 . Then, the daily runoff against the stormwater system capacity was easily plotted to visualize overflow events in figure 6. The relationship between daily precipitation and overflow status was then plotted and shown in figure 7. The results obtained in this way can be applied in water resource management, as well as where direct visualization and analysis of particular data are required.iye

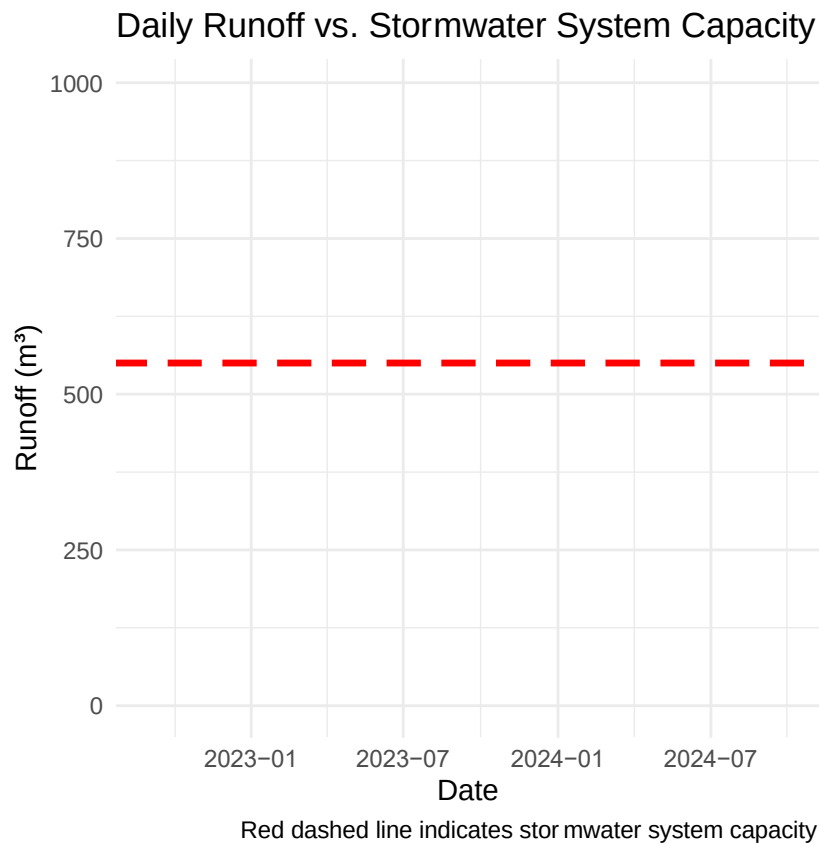


Figure 6: Daily runoff vs stormwater system capacity

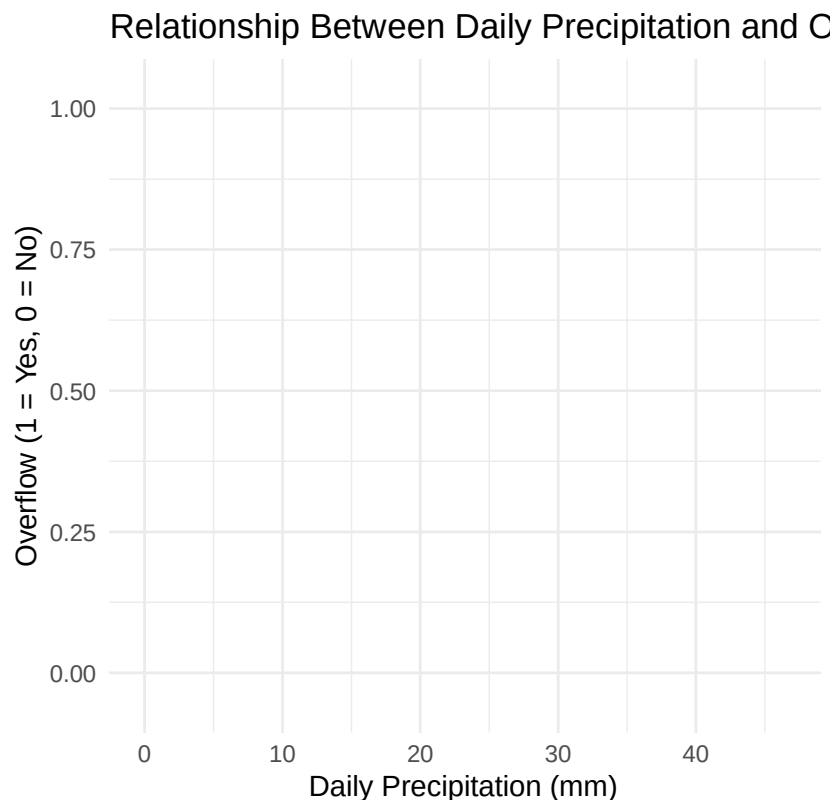


Figure 7: Relationship between Daily Precipitation and Overflow Status

8 Conclusion

The study simulated the precipitation runoff process in an urbanized area. It was decided to conduct the research in Levice's developed Vinohrady neighbourhood. After calculating the three days with the most runoff, the study discovered 31788.555 m³ of total runoff. It has simulated three overflow days with a relatively small total runoff overflow volume of 884.3683m³. The overflow figure demonstrates that the system was able to regulate the runoff for the most part. The system's capacity is currently adequate for normal to moderate rainfall events, as evidenced by the overflow days' relatively small percentage of all the total number of days examined. There are still methods to lessen the frequency of overflow days even though they don't occur frequently. To mitigate peak runoff volumes, for example, increasing the amount of green infrastructure—such as rain gardens and green roofs—for extreme events is a sustainable way to promote infiltration, evapotranspiration, and temporary storage. Stormwater system design capacity can be analyzed, modelled, and optimized with the help of the robust R programming language. It is thought of as a high-level programming language. [12] This classification is based on the level of abstraction from machine language. By performing statistical computations, it merely makes efficient data realization and visualisation possible, offering insightful information about the capacity planning and stormwater system performance. Rainfall patterns, both spatial and temporal, have a major impact on stormwater management. It can analyze rainfall on a daily, seasonal, or annual basis, revealing patterns that may not be visible in raw data. It can handle complex data formats. Understanding the stormwater system's baseline performance and spotting trends or abnormalities depend heavily on this stage of the analysis process.

9 References

- [1] LOGGIA, LA. G., FONTANAZZA, M.C., FRENI, G., NOTARO, V., OLIVERI, E., PULEO, V. Urban drainage and sustainable cities: how to achieve flood resilient societies? *WIT Transactions on the Built Environment*, 2012. Volume 122. Pages 203-214. ISSN 1743-3509.
- [2] *PARIS AGREEMENT*, 2016 - United Nations Framework Convention on Climate Change, 12 December 2015, Paris.
- [3] *ENVIROPORTAL - Information portal of the Ministry of the Environment of the Slovak Republic*. Adaptation strategy of the Slovak Republic to the adverse effects of climate change -update [online]. © 2005- 2021 www.enviroportal.sk .Available From: <https://www.enviroportal.sk/sk/eia/detail/strategia-adaptacie-slovenskej-republiky-na-adverse-consequences-of-change>.
- [4] LAURENČÍK, J. Final Report of hydrogeological survey. Nitra: Geo spol.s.r.o. Nitra 2005.p.16
- [5] ŽIARAN, J. The town zoning plan (UPN-O) Levice. Košice: architectural office ARKA, spol.s.r.o.,2015 p.187-198
- [6] ZBGIS, Available at: <https://zbgis.skgeodesy.sk/mapka/sk/kataster?pos=48.800000,19.530000,8>
- [7] SZTRUHÁR, D., SOKÁČ, M. *Hydrology of urbanized areas*. Slovak University of Technology in Bratislava, STU Publishing House. Bratislava, 2005. ISBN 80-227- 2220-0.
- [8] DAVID BUTLER, CHRISTOPHER DIGMAN, CHRISTOS MAKROPOULUS , JOHN W. DAVIES :/ Urban Drainage 4th Edition: 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, 2018 by Taylor & Francis Group, LLC , ISBN : 978-1-4987-5058-5 (Paperback) , 978-1-4987-5293-0 (Hardback)
- [9] RATIONAL METHOD, HydroCAD Stormwater Modelling , Available at: <https://www.hydrocad.net/rational.htm#:~:text=The%20Rational%20method%20predicts%20the,as%20consistent%20units%20are%20employed.>
- [10] R ENVIRONMENT, Available at <https://www.r-project.org/about.html>
- [11] RUNOFF, available at : https://bbec.ac.in/wp-content/uploads/wpforo/default_attachments/1629365440-Module-5-Runoffpdf.pdf
- [12] WHAT IS R? AN INTRODUCTION TO THE STATISTICAL COMPUTING POWERHOUSE, available at: <https://www.datacamp.com/blog/all-about-r>

Abstrakt

Hospodárenie s dažďovou vodou v mestách je čoraz viac ohrozené účinkami zmeny klímy, najmä zmenami v zrážkových vzorcoch. Tento príspevok skúma vplyv intenzívnych zrážok na hospodárenie s dažďovou vodou vo vhodnej mestskej časti Levice. Počas troch rokov bol systém dažďovej vody analyzovaný z hľadiska jeho účinnosti pri riadení denného odtoku a predchádzaní udalostiam pretečenia pomocou metódy Rational a programovania R. Programovanie R je výkonný nástroj na štatistickú analýzu, vizualizáciu údajov a modelovanie, vďaka čomu je pre hydrologické štúdiá nevyhnutné analyzovať a simulovať zložité vzory údajov. Štúdiá zistila, že systém bol účinný pri zvládaní väčšiny dažďových udalostí, pričom bolo identifikovaných tri dni pretečenia. Výsledky naznačujú, že súčasná kapacita systému je dostatočná pre typické poveternostné podmienky, ale navrhuje cieľené zlepšenia, ako je implementácia riešení zelenej infraštruktúry na zníženie objemov odtoku.

Vliv variantního uspořádání agrolesnických systémů na erozní poměry

Lukáš Buršík

Abstrakt

Agrolesnické systémy jsou definovány jako systémy hospodaření na půdě, v rámci kterých je stejný pozemek zároveň využíván k pěstování stromů a k zemědělské produkci. Mezi základní typy patří silvoorebný agrolesnický systém, tedy pěstování dřevin na orné půdě, a silvopastevný agrolesnický systém, ve kterém jsou dřeviny pěstovány na trvalých travních porostech nebo výmladkových porostech. Cílem tohoto příspěvku je zjistit, jakým způsobem lze variantním uspořádáním agrolesnických systémů ovlivnit erozní poměry v dané lokalitě. Konkrétně se jedná o jeden díl půdního bloku o výměře 24 hektarů, který se nachází v katastrálním území Modřec (jeden z katastrů města Polička) v Pardubickém kraji v okrese Svitavy.

Bylo provedeno celkem 18 variant uspořádání agrolesnických systémů, v některých z nich se navíc uvažovalo s vrstevnicovým obděláváním. Jednotlivé varianty se lišily orientací ochranných pásů dřevin (s mírným odklonem od vrstevnic, po spádnicí), dále pak šířkou těchto pásů (1 m, 3 m, 6 m a 10 m) a vzdáleností mezi nimi (24 m, 50 m a 100 m).

Následně byly pro všechny varianty vypočteny dlouhodobé průměrné ztráty půdy, přičemž bylo počítáno se dvěma variantami C faktoru, a to C faktorem rozdílným, který jednotlivým plochám přiřazuje konkrétní C faktor, a C faktorem průměrným pro celý díl půdního bloku.

Pro zvolené území se vzhledem k erozním poměrům jako nejúčinnější jeví agrolesnický systém s ochrannými pásy dřevin o šířce 10 m s mírným odklonem od vrstevnic a s vrstevnicovým obděláváním. Bylo zjištěno, že z hlediska protierozní ochrany je nutné doplnit agrolesnické systémy i plošnými opatřeními, a to konkrétně vrstevnicovým obděláváním, případně dalšími liniovými prvky (například příkopem nebo průlehem).

Anotace

Příspěvek se zabývá vlivem variantního uspořádání agrolesnických systémů na erozní poměry v dané lokalitě. Celkem bylo provedeno 18 variant uspořádání, v některých z nich se navíc uvažovalo s vrstevnicovým obděláváním. Nejúčinnější variantou vzhledem k erozním poměrům se jeví agrolesnický systém s ochrannými pásy o šířce 10 m s mírným odklonem od vrstevnic a s vrstevnicovým obděláváním.

Klíčová slova: agrolesnický systém, ochranný pás dřevin, vrstevnicové obdělávání, ztráta půdy

Abstract

Agroforestry systems are defined as systems of land management in which the same parcel of land is simultaneously used for growing trees and for agricultural production. The basic types include silvoarable agroforestry system, i.e. growing trees on arable land, and silvopasture agroforestry systems, in which trees are grown on permanent grassland or coppice. The aim of this paper is to investigate how variations in agroforestry systems can influence erosion conditions in a given locality. Specifically, it is one land block with an area of 24 hectares, located in the cadastral area of Modřec (one of the cadastral areas of the town of Polička) in the Pardubice Region in the Svitavy District.

A total of 18 variants of agroforestry systems were made, in some of which contour farming was also considered. The individual variants differed in the orientation of the shelterbelts (with a slight deviation from the contour lines, along the fall line), the width of these shelterbelts (1 m, 3 m, 6 m, and 10 m), and the distance between them (24 m, 50 m, and 100 m).

Subsequently, long-term average soil losses were calculated for all the variants, using two variants of the C factor, namely the C factor differential, which assigns a specific C factor to each area, and the C factor average for the whole land block.

For the selected area, an agroforestry system with 10 m wide shelterbelts with a slight deviation from the contour lines and with contour farming seems to be the most effective in terms of erosion conditions. It was found that, in relation to anti-erosion protection, agroforestry systems need to be supplemented by area measures, namely contour farming, or other linear elements (e.g. broad-base terraces).

Annotation

The paper deals with the effect of the variants of agroforestry systems on the erosion condition in the area. A total of 18 variants were made, in some of which contour farming was also considered. The most effective variant, considering the erosion conditions, appears to be an agroforestry system with 10 m wide shelterbelts with a slight deviation from the contour lines and with contour farming.

Keywords: agroforestry system, shelterbelt, contour farming, soil loss

1 Úvod

V minulosti byla naše zemědělská krajina velmi rozmanitá a pozemky byly běžně ohraničeny remízky s převahou dřevin. Avšak zejména v období kolektivizace docházelo ke scelování, jehož výsledkem jsou i několikasethektarové lány. Jednou z možností, jak hospodaření v krajině zlepšit, jsou agrolesnické systémy. (Houška, 2020) Ty jsou definovány v rámci společné zemědělské politiky Evropské unie v nařízení 1305/2013 v článku 23 jako systémy hospodaření na půdě, kdy je stejný pozemek zároveň využíván k pěstování stromů a k zemědělské produkci (Evropská unie, 2013; Lojka et al., 2020).

Dřeviny pěstované v agrolesnických systémech plní produkční funkci (např. ovoce, krmivo pro zvířata, konstrukční a palivové dřevo), mimoto mají i významné ekosystémové a mimoprodukční funkce (Lojka et al., 2020). Důležitý je rovněž fakt, že stromy poskytují úkryt pro dobytek v případě špatného počasí nebo extrémního horka (Lojka et al., 2023). Agrolesnické systémy mohou přispět ke zmírnění klimatických změn, zlepšení vodního hospodářství krajiny a podpoře biodiverzity. Jejich nejdůležitější příznivé účinky jsou protierozní a retenční, kdy zpomalují evapotranspiraci a odtok srážkové vody. Mimoto poskytují přívětivější prostředí pro člověka. (Horáková et al., 2023; Sobotková et al., 2023)

Základní rozdělení agrolesnických systémů v České republice sleduje trend v ostatních zemích Evropy a vymezuje základní kategorie (Dupraz et al., 2018; Lojka et al., 2020):

- *Silvoorebné* – pěstování dřevin na orné půdě
- *Silvopastevní* – pěstování dřevin na trvalých travních porostech nebo výmladkových porostech rychlerostoucích dřevin s chovem zvířat
- *Agrolesnictví v trvalých kulturách (sadech)*
- *Liniové výsadby dřevin na okrajích půdních bloků*
- *Městské/vesnické agrolesnictví* (dřeviny v zastavěném území)



Obrázek 1: Ukázka silvoorebného agrolesnického systému (zdroj: <https://www.agroforestry.co.uk/wp-content/uploads/2018/05/silvoarable1.jpg>)

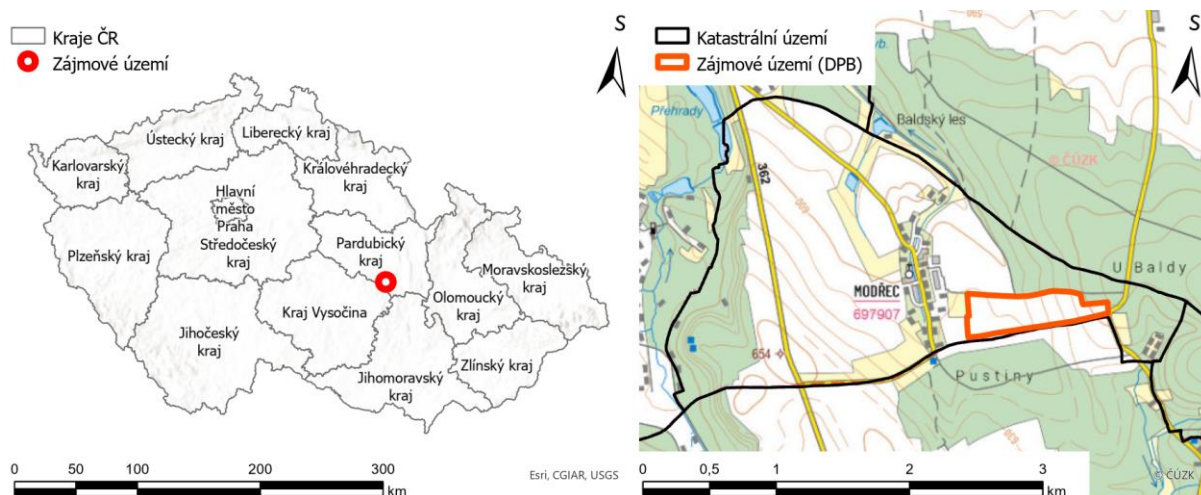


Obrázek 2: Ukázka silvopastevního agrolesnického systému (zdroj vlastní)

2 Materiál a metody

2.1 Zájmové území

Jako zájmové území byl zvolen jeden díl půdního bloku (dále jen DPB) nacházející se v jihovýchodní části katastrálního území Modřec, které je možné nalézt v Pardubickém kraji v okrese Svitavy (viz obrázek 3). Jde o jeden z katastrů města Polička.



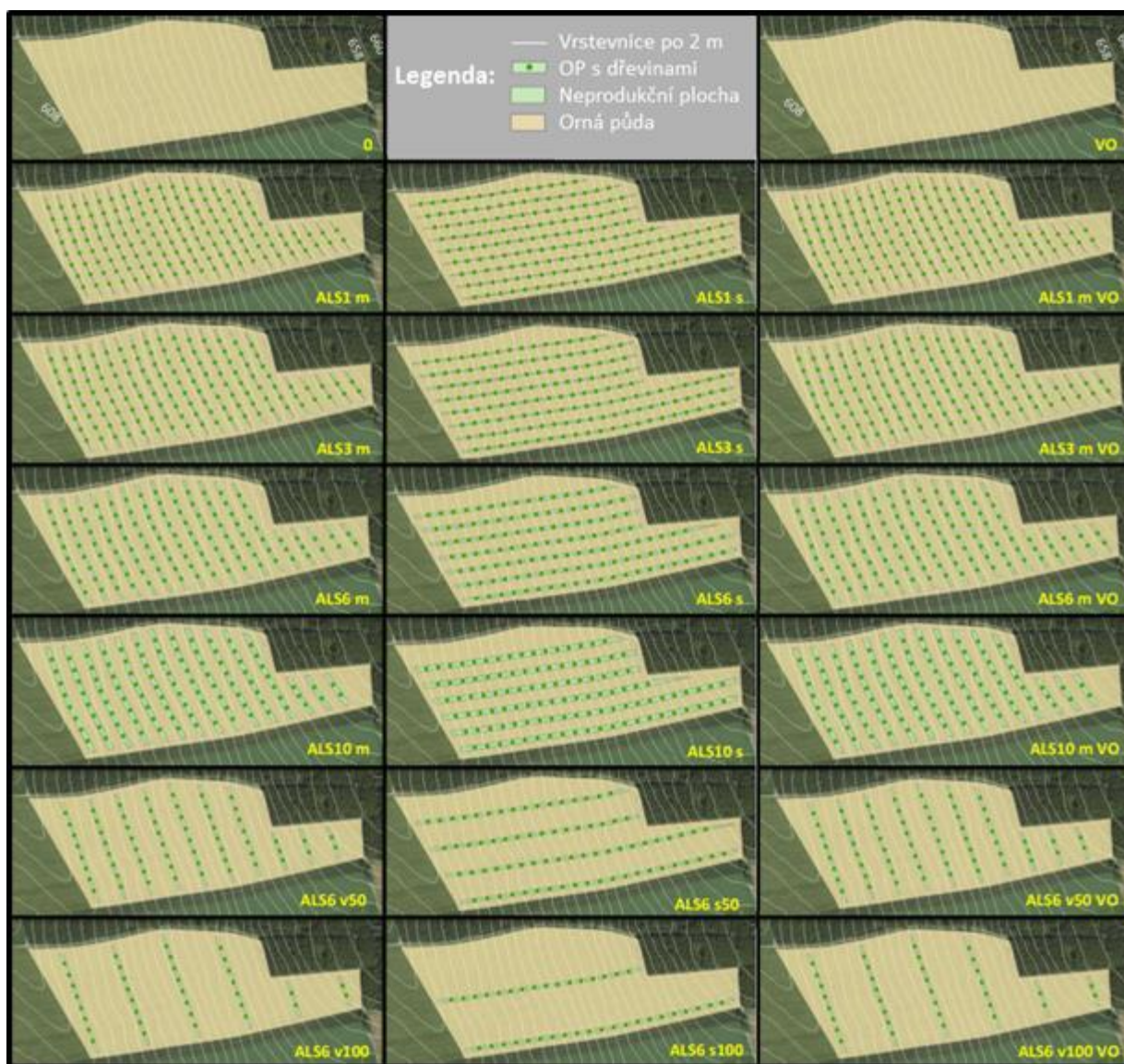
Obrázek 3: Zájmové území na mapě ČR (vlevo) a jeho poloha v rámci k. ú. Modřec (vpravo)

Tento DPB o výměře 24 hektarů je využíván jako standardní orná půda uživatelem AGRONEA a.s. Polička. Nachází se v nadmořské výšce 605 až 659 m n. m. a jeho průměrný sklon je 6 %. Území je tvořeno převážně kambizemí modální mesobazickou (KAa'), dále se zde v menší míře vyskytují pseudoglej modální (PGm) a pseudoglej glejový (PGq). Lokalita spadá do mírně chladného, vlhkého klimatického regionu.

2.2 Návrh agrolesnických opatření

Jednotlivé varianty návrhu agrolesnických systémů jsou představeny na obrázku 4. Šířky ochranných pásů dřevin (dále jen OP) musí být nejméně 1 m a nejvýše 10 m (Česká republika, 2023). Byly zvoleny šířky **1 m** (nejnižší možná), **3 m**, **6 m** (doporučené maximum) a **10 m** (maximum). Šířka OP 6 m byla stanovena jako optimální pro návrh a porovnání různých variant opatření. Vzdálenost mezi OP musí být v intervalu 10 m až 100 m (Česká republika, 2023). Byla zvolena **24 m** (optimum), dále pak **50 m** a **100 m**.

Varianty OP s mírným odklonem od vrstevnic jsou označeny písmenem **m**, případně **v** a varianty s OP po spádnicí písmenem **s**. V případě variant s úvahou vrstevnicového obdělávání je použita zkratka **VO**.



Obrázek 4: Varianty návrhu agrolesnických systémů (Vaňousová, 2024 – upraveno)

2.3 Výpočet dlouhodobé průměrné ztráty půdy vodní erozí

Dlouhodobá průměrná ztráta půdy vodní erozí se obvykle vypočte s využitím tzv. univerzální rovnice ztráty půdy USLE (Universal Soil Loss Equation), která byla definována W. H. Wischmeierem a D. D. Smithem roku 1978 a její základní tvar je následující (Podhrázká et al., 2024):

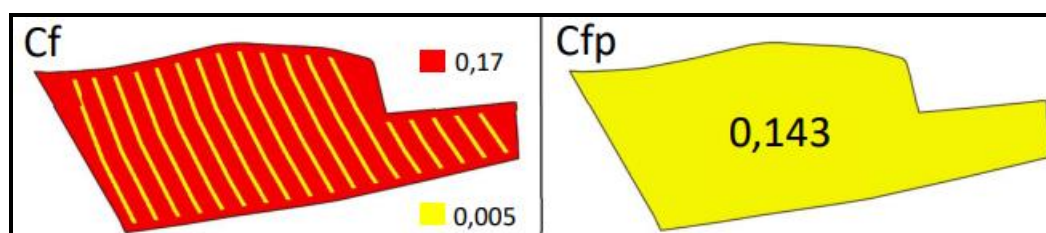
$$G = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

G	průměrná dlouhodobá ztráta půdy [$t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$]
R	faktor erozní účinnosti deště vyjádřený v závislosti na kinetické energii, úhrnu a intenzitě erozně nebezpečných dešťů [$MJ \cdot ha^{-1} \cdot cm \cdot h^{-1}$]
K	faktor erodovatelnosti půdy vyjádřený v závislosti na textuře a struktuře ornice, obsahu organické hmoty v ornici a propustnosti půdního profilu [$t \cdot MJ^{-1} \cdot h \cdot cm^{-1}$]
L	faktor délky svahu vyjadřující vliv nepřerušené délky svahu na velikost ztráty půdy erozí [-]
S	faktor sklonu svahu vyjadřující vliv sklonu svahu na velikost ztráty půdy erozí [-]
C	faktor ochranného vlivu vegetačního pokryvu vyjádřený v závislosti na vývoji vegetace a použité agrotechnice [-]
P	faktor účinnosti protierozních opatření [-]

Jde tedy o součin šesti faktorů, přičemž faktory L a S jsou obvykle počítány dohromady jako LS faktor (topografický faktor).

Aby bylo možné porovnat výsledky všech variant návrhu agrolesnických systémů, pro výpočet dlouhodobé ztráty půdy vodní erozí, byl použit zjemněný rastr digitálního modelu reliéfu České republiky čtvrté generace (DMR 4G), a to z $5 m \times 5 m$ na $0,5 m \times 0,5 m$. Díky tomu jsou v rastru viditelné i OP široké 1 m. (Vaňousová, 2024)

Při stanovení erozního smyvu byly využity dvě varianty C faktoru. C faktor rozdílný **Cf** přiřazuje konkrétní hodnotu C faktoru zatravněným i nezatravněným plochám i plodinám. Naopak C faktor průměrný **Cfp** představuje jednu jedinou hodnotu pro celé území (vážený průměr).



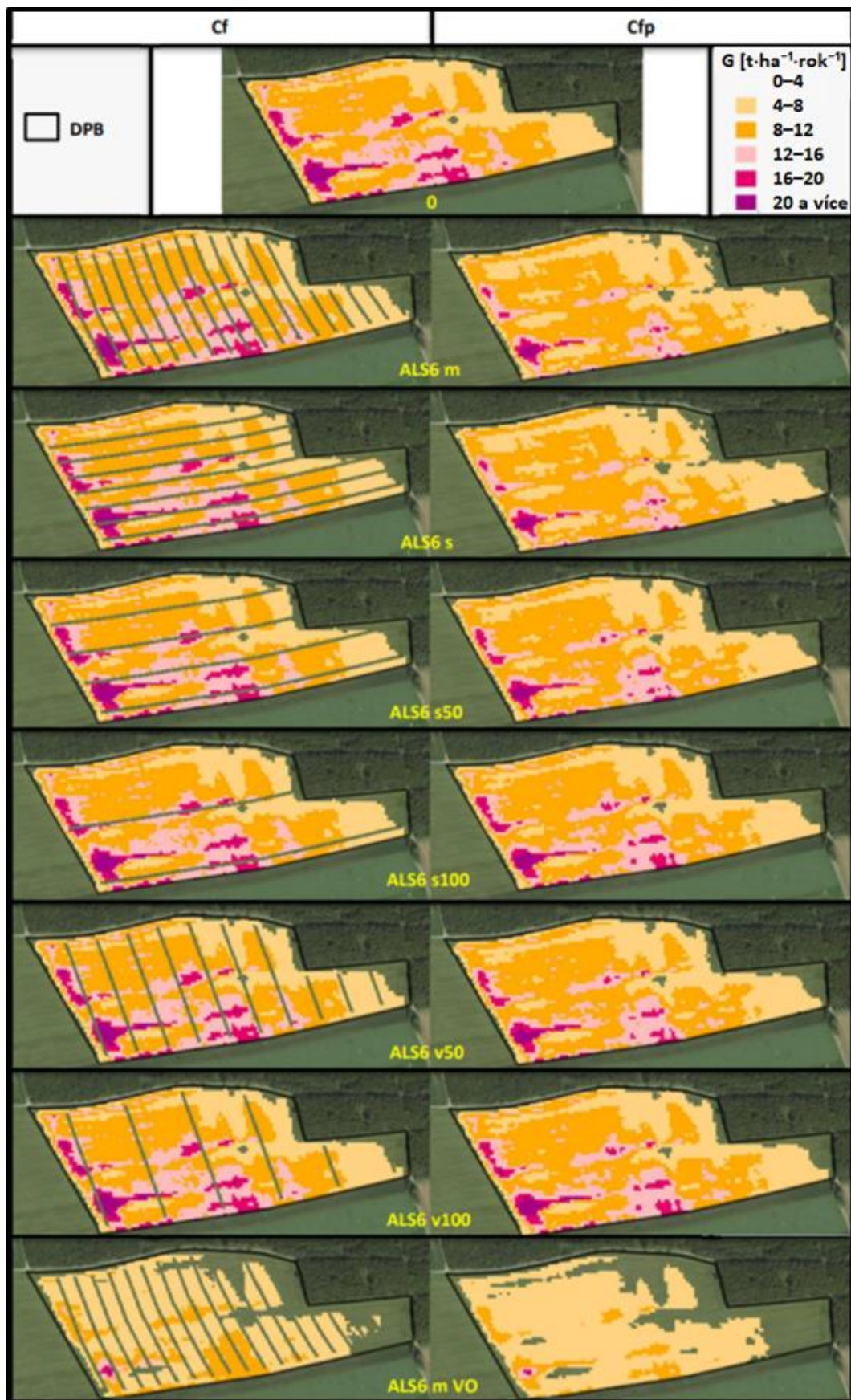
Obrázek 5: Ukázka rozdílu Cf a Cfp pro ALS6 m a plodinu ječmen ozimý (Vaňousová, 2024)

3 Výsledky

Jako ukázka výsledků je zobrazena průměrná dlouhodobá ztráta půdy při různých variantách agrolesnických systémů s OP širokými 6 m s plodinou ječmenem ozimým ($C_f = 0,17$) – viz obrázek 6. Navržená opatření jsou porovnávána vůči variantě 0 – bez opatření.

Na obrázku 6 se při výpočtu eroze mění C faktor vlivem OP. Už z tohoto lze pozorovat určité zjednodušení a jednoduchou spojitost, a to fakt, že více OP má za následek snížení erozního ohrožení. Z obrázku je zřejmé, že lze ohrožení podstatně snížit, pokud je pozemek navíc obděláván po vrstevnici.

V tabulkách 1 a 2 je pro každou variantu návrhu uspořádání uvedena průměrná dlouhodobá ztráta půdy. V jednotlivých variantách se uvažuje se třemi různými plodinami, a to ječmenem ozimým, řepkou ozimou a kukuřicí na siláž. Dále je z tabulek mimo jiné patrné, o kolik procent se sníží erozní ohrožení při zvolení konkrétní varianty.



Obrázek 6: Průměrná dlouhodobá ztráta půdy při různých variantách agrolesnických systémů s OP širokými 6 m (Vaňousová, 2024 – upraveno)

Tabulka 1: Průměrná dlouhodobá ztráta půdy při různých variantách agrolesnických systémů – bez plošných opatření

Varianty ALS dle šířky, vzdálenosti, kombinací	G [t·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹]						Snížení eroze [%]		Plocha OP ALS [%]	
	ječmen ozimý C faktor = 0,17		řepka ozimá C faktor = 0,22		kukuřice na siláž C faktor = 0,72					
	Cf	Cfp	Cf	Cfp	Cf	Cfp	Cf	Cfp	[ha]	[%]
0	9,77		12,65		41,40		0		0	
ALS1 m	9,44	9,49	12,22	12,28	39,99	40,18	3,39	2,94	0,40	3,28
ALS3 m	8,85	8,91	11,45	11,53	37,48	37,74	9,47	8,82	1,12	9,25
ALS6 m	8,11	8,22	10,50	10,64	34,36	34,82	16,99	15,88	1,98	16,41
ALS10 m	7,33	7,47	9,49	9,67	31,06	31,66	24,97	23,53	2,90	24,05
ALS1 s	9,44	9,43	12,21	12,20	39,96	39,94	3,46	3,53	0,42	3,50
ALS3 s	8,83	8,85	11,43	11,46	37,39	37,50	9,68	9,41	1,14	9,48
ALS6 s	8,09	8,16	10,47	10,57	34,28	34,58	17,19	16,47	2,01	16,68
ALS10 s	7,21	7,53	9,33	9,75	30,54	31,90	26,24	22,94	2,88	23,85
ALS6 s50	8,73	8,85	11,30	11,46	36,99	37,50	10,66	9,41	1,18	9,82
ALS6 s100	9,22	9,31	11,93	12,05	39,03	39,45	5,71	4,71	0,59	4,89
ALS6 v50	8,91	8,97	11,52	11,61	37,72	37,99	8,89	8,24	1,05	8,70
ALS6 v100	9,24	9,31	11,95	12,05	39,12	39,45	5,49	4,71	0,61	5,04

Tabulka 2: Průměrná dlouhodobá ztráta půdy při různých variantách agrolesnických systémů – s úvahou vrstevnicového obdělávání

Varianty ALS dle šířky, vzdálenosti, kombinací	G [t·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹]						Snížení eroze [%]		Plocha OP ALS [%]	
	ječmen ozimý C faktor = 0,17		řepka ozimá C faktor = 0,22		kukuřice na siláž C faktor = 0,72					
	Cf	Cfp	Cf	Cfp	Cf	Cfp	Cf	Cfp	[%]	[ha]
0	9,77		12,65		41,40		0		0	
VO	5,86		7,59		24,84		40,0		0	
ALS1 m VO	5,67	5,69	7,33	7,37	24,00	24,11	42,03	41,76	0,40	3,28
ALS3 m VO	5,31	5,35	6,87	6,92	22,49	22,65	45,68	45,29	1,12	9,25
ALS6 m VO	4,87	4,93	6,30	6,38	20,62	20,89	50,20	49,53	1,98	16,41
ALS10 m VO	4,40	4,48	5,69	5,80	18,64	18,99	54,98	54,12	2,90	24,05
ALS6 v50 VO	5,34	5,38	6,91	6,96	22,63	22,79	45,33	44,94	1,05	8,70
ALS6 v100 VO	5,54	5,59	7,17	7,23	23,47	23,67	43,30	42,82	0,61	5,04

Vysvětlivky pro tabulky 1 a 2:

Cf C faktory rozdílné (dle plodiny a pro travní porost)

Cfp C faktor průměrný na celý DPB

ALS1 OP o šířce 1 m po 24 m

ALS10

OP o šířce 10 m po 24 m

ALS3 OP o šířce 3 m po 24 m

ALS6 50

OP o šířce 6 m po 50 m

ALS6 OP o šířce 6 m po 24 m

ALS6 100

OP o šířce 6 m po 100 m

m / v OP s mírným odklonem od vrstevnic

s OP po spádnicí

VO vrstevnicové obdělávání

4 Závěr

Jako nejúčinnější varianta pro zvolené území se jeví ALS10 m VO, tedy agrolesnický systém s OP o šířce 10 m s mírným odklonem od vrstevnic a s vrstevnicovým obděláváním. Při této variantě se erozní ohrožení sníží přibližně o 55 % při použití Cf, respektive o 54 %, pokud se aplikuje Cfp.

Jak již bylo zmíněno, je zřejmé, že vrstevnicové obdělávání výrazně přispěje ke snížení ohrožení území vodní erozí. Pro porovnání varianta ALS10 m (obdobná jako první uvedená, pouze bez vrstevnicového obdělávání) je schopná erozní ohrožení snížit jen zhruba o 25 % (v případě použití Cf), respektive o 24 % (při aplikaci Cfp). Závěrem lze tedy konstatovat, že z hlediska protierozní ochrany je nutné doplnit agrolesnické systémy i plošnými opatřeními, a to konkrétně vrstevnicovým obděláváním, případně dalšími liniovými prvky (například příkopem nebo průlehem).

5 Poděkování

Tento příspěvek je výstupem projektu standardního specifického výzkumu FAST-S-24-8540 „Inovativní měření a modelování ve vodním hospodářství pro udržitelnost vodních zdrojů“.

6 Literatura

Česká republika, 2023: Nařízení vlády č. 140/2023 Sb., o stanovení podmínek provádění opatření agrolesnictví a o změně nařízení vlády č. 307/2014 Sb., o stanovení podrobností evidence využití půdy podle uživatelských vztahů, ve znění pozdějších předpisů, a nařízení vlády č. 69/2023 Sb., o stanovení podmínek provádění opatření v odvětví vína, (nařízení vlády o stanovení podmínek provádění opatření agrolesnictví). In: *Zákony pro lidi.cz* [online] [cit. 2024-10-12]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2023-140>

Dupraz, Ch., Lawson, G. J., Lamersdorf, N., Papanastasis, V. P., Rosati, A. et al., 2018: Temperate agroforestry: the European way. In: Gordon, A. M., Newman, S. M. a Coleman, B. R. W. (ed.). *Temperate agroforestry systems*. 2. vydání. Wallingford, Spojené království: CABI, s. 98–152. ISBN 978-1-78064-487-5.

Evropská unie, 2013: Nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 1305/2013 ze dne 17. prosince 2013 o podpoře pro rozvoj venkova z Evropského zemědělského fondu pro rozvoj venkova (EZFRV) a o zrušení nařízení Rady (ES) č. 1698/2005, 2013. In: *Úřední věstník Evropské unie*. ISSN 1977-0626.

Horáková, V., Dumbrovský, M., Sobotková, V., Kameníčková, I., 2023: Agrolesnictví a jeho vliv na komplex hydopedologických vlastností půdy. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. Roč. 65, č. 2, s. 30–38. ISSN 0322-8916.

Houška, J., 2020: Agrolesnictví pomůže krajině i zemědělství. Online. *Biom.cz*. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/agrolesnictvi-pomuze-krajine-i-zemedelstvi>. [cit. 2024-10-16].

Lojka, B. a Humešová, T. et al., 2023: Agrolesnictví – nová alternativa nebo návrat k tradicím? Online. *Agromanual.cz*. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/agrolesnictvi-nova-alternativa-nebo-navrat-k-tradicim>. [cit. 2024-10-15].

Lojka, B., Martiník, A., Weger, J., Houška, J., Doležalová, H. et al., 2020: *Zavádění agrolesnických systémů na zemědělské půdě* (certifikovaná metodika – osvědčení MZe 2/2020-18133). Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-3061-0.

Podhrázská, J., Bednář, M., Dostál, T., Dumbrovský, M., Hanel, M. et al., 2024: *Ochrana zemědělské půdy před erozí* (metodika). Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy. ISBN 978-80-88664-00-0.

Sobotková, V., Dumbrovský, M., Weger, J., 2023: Agrolesnické systémy pro ochranu a obnovu funkcí krajiny a jejich uplatnění v procesu pozemkových úprav. *Pozemkové úpravy*. Březen 2023, s. 3–7. ISSN 1214-5815.

Vaňousová, M., 2024: *Vyhodnocení erozních a odtokových poměrů v souvislosti s návrhem agrolesnických systémů*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

Obmedzuje výskyt ťažkých kovov použitie vyčistenej odpadovej vody na závlahu, ak sa aplikuje kvartérne dočistenie?

Jakub Jurík, Ronald Zakhar

Abstract

Current climate situation on Earth is becoming more and more constricting on water sources. There are multiple parts of the world where drinking water is a problem. Lately, not only high-quality drinking water is a problem, but also water for crop irrigation is becoming scarce. Water reuse offers itself as a relatively simple idea which needs high attention. There are many fields which need to be monitored and checked for more positive outcomes. While the water itself in wastewater does not change its chemical structure, the accompanying secondary constituents do not impose health improvements for its consumers. There are many constituents in the wastewater which are not wanted, such as: heavy metals, pharmaceuticals, drugs and its intermediates, pesticides, organics. On the other hand, using the water for recycle purposes reduces the local water use, and to some extent can contain good amount of macro/micronutrients needed for grain or vegetable grow. One needs to watch also previously mentioned unwanted constituents in the soil and grown food. The worst what could happen is accumulation of heavy metals in soil and reducing its ability to support growth of crops. This could have long-lasting effects with risk of causing serious health issues to consumers. Higher uptake of pharmaceuticals and drugs could affect microbial resistance, which could end with immunity to pills. In this work, we put our attention into heavy metals. In this day and age, they are relatively easy to come by, because of worldwide industrialization. Fossil fuels, electronics, car batteries are just a few examples which could be sources of arsenic (As), chromium (Cr), lead (Pb), zinc (Zn), copper (Cu), cadmium (Cd), nickel (Ni) and mercury (Hg). Wastewater treatment plant (WWTP) in Trnava (Slovakia) served as treated wastewater source for our project. The WWTP is not completely sufficient to remove mixture of such micropollutants, so we put another set of “barriers” before the water was used for irrigation. The container with technological unit (ASIO, s.r.o., Czech republic) included disc filter Azud modular 100 (SISTEMA AZUD, S.A., Spain) for mechanical pretreatment, coagulation with iron sulphate PREFLOC – PIX113 (Kemifloc, a.s., Czech republic) in a reagent tank and controlled pH, ultrafiltration unit Inge Dizzer P4040-6 (BASF, USA) which was followed by granulated activated carbon bed Aquasorb 6300 (The Jakobi Carbons Group, Sweden) and UV disinfection lamp (Aquatarm C800, Slovakia). The quaternary treated water was used for common, commercially sold root vegetables such as onions (Crockett), potatoes (Laura), carrots (Romance), parsley (Efez). We achieved removal of copper, nickel and zinc. Other heavy metals were under limit of quantification. Results from soil analysis were positive for the project. We achieved lower amounts of heavy metals in project soil with all root vegetables compared to reference. The exception was As, which was revealed to be higher except for project soil with parsley. Selenium was minimally over the allowed limit of all soils. We chose limits for sandy, loamy-sandy soil type according to Vyhláška Ministerstva pôdohospodárstva Slovenskej republiky a jej Príloha č. 7 k vyhláške č. 508/2004 Z. z. as it has the strictest limits. Important result is that no soil limits were exceeded. Highest amount of heavy metals was in reference soil with onion while lowest was achieved in soil with potatoes. Lowest heavy metal content in project soil was measured to be tied between onion and parsley. Amounts of heavy metals in root vegetables were significantly lower than set maximum limits according to NARIADENIE KOMISIE (ES) č. 1881/2006, although Hg is important to measure, because of its low maximum limit. Heightened amounts of heavy metals were measured in potatoes compared to other vegetables.

klúčové slová: kvartérne čistenie, opätovné využitie vody, plodiny, vyčistená odpadová voda, ťažké kovy, závlaha

1 Úvod

Opätovné použitie vyčistenej odpadovej vody na závlahy vie zredukovať použitie čerstvej vody. Taktiež môže takáto voda prispieť k úrodnosti pôdy, pretože obsahuje makro a mikronutrienty ako N, P, K, Fe, Zn, Cu a Mn. Prispieva aj k rastu plodín a znižuje množstvo používaných hnojív. Takáto voda môže ale taktiež spôsobiť vážne problémy (Benaafi, 2024). Vo vode sa môžu nachádzať rôzne formy znečistenia ako ťažké kovy, chemikálie, organická hmota, ktoré ovplyvňujú vodný biotop a dokonca aj ľudské zdravie. Pravidelným používaním takejto vody na rôzne účely, medzi ktoré môžeme zaradiť aj vodu pitnú, na závlahy a rekreáciu by sme mohli spôsobiť trvalé zdravotné následky subjektom, ktoré prichádzajú s takouto vodou do styku. Tieto látky sa môžu dostávať do vody z domácností, priemyselných výrobní ale aj napríklad splachom z pevných plôch. V projekte sme sledovali ťažké kovy ako arzén (As), chróm (Cr), olovo (Pb), zinok (Zn), meď (Cu), kadmium (Cd), nikel (Ni) a ortuť (Hg).

Ťažké kovy a ich vlastnosti

Ťažké kovy sú definované ako prvky, ktoré majú vysokú atómovú hmotnosť a hustotu. Obsah ťažkých kovov v splachu do kanalizačného systému môže byť spôsobený vymývaním pôd a skál. Viaceré štúdie taktiež poukazujú na zdravotné riziko pri požívaných potravinách pestovaných na kontaminovanej pôde (Dhokpande, 2024). Ťažké kovy nie sú biodegradovateľné a akumulujú sa v živočíchoch (vrátane človeka) pri prijímaní vody a potravy s ich obsahom. As a Cd sú taktiež považované za spúšťače/prekursor rakoviny. V tabuľke 1 sú uvedené ťažké kovy a ich stručná charakteristika. Samozrejme, koncentrácia týchto látok taktiež ovplyvňuje vplyv na človeka. Nižšie koncentrácie môžu spôsobiť nevoľnosť, zatiaľ čo vyššie koncentrácie výrazne vplývajú na viacero orgánov v ľudskom tele (Almayyahi, 2023).

Tabuľka 1: Stručný popis ťažkých kovov (Almayyahi, 2023)

Ťažký kov	M.h. (g/mol)	Ox. číslo	Zdroj znečistenia	Vplyv na človeka
As	74,9	-3, +3, +5	elektronika	poškodenie pokožky a krvného obehu, rakovina
Cd	112,4	+2	chemický priemysel	poškodenie obličiek, rakovina
Cr	52	0, +2, +3, +6	výroba ocele	alergie, nevoľnosť (zvracanie, hnačky)
Cu	63,5	+1, +2	elektrika/rúrky	poškodenie tráviaceho traktu a pečene
Pb	207,2	+2, +4	batérie	poškodenie obličiek, vývin nervového systému
Hg	200,6	+1, +2	spaľovacie motory	poškodenie nervového systému

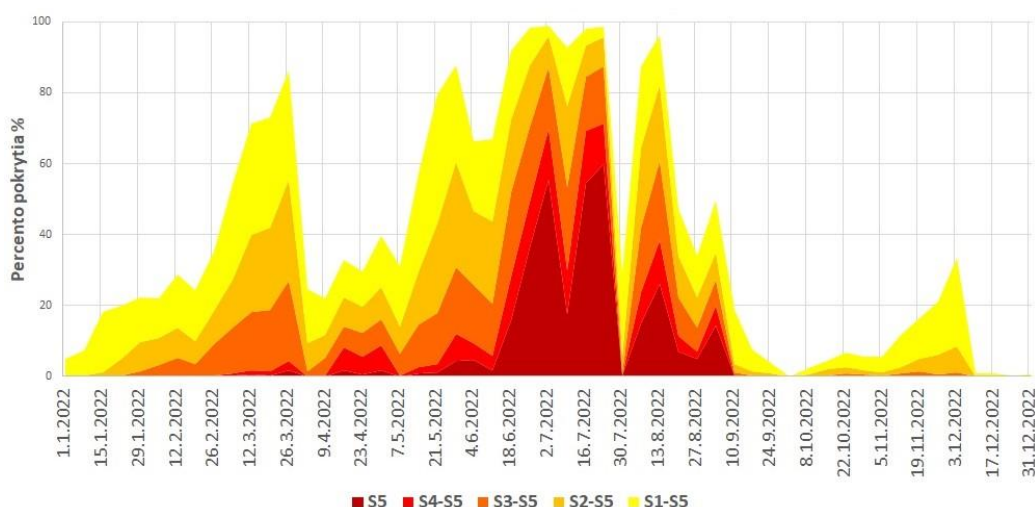
Ťažké kovy a životné prostredie

Redukcia obsahu ťažkých kovov v odtekajúcej odpadovej vode je potrebné z dôvodu ich akumulácie, ktorá môže byť problémom v budúcnosti. Týmto spôsobom sa vytvoria znehodnotené časti ekosystému a ak by aj nedošlo k nadpriemernému znečisteniu životného prostredia, biodiverzita by bola výrazne ovplyvnená. K znečisteniu vodných telies vie dôjsť veľmi jednoducho kvôli splachom z priemyselných parkov, motorovým vozidlám ale aj zlému narábaniu s nebezpečným odpadom (Dhokpande, 2024).

Ťažké kovy a opätovné použitie vody

Opätovné využitie vody nie je vo svete až tak neznámou témou. Sú mnohé oblasti sveta ako tropické, sub-tropické, vyprahnuté časti Ázie, Arabský polostrov a Severná Afrika, ktoré trpia nedostatkom čistej a ľahko dostupnej vody nie len na závlahu, ale aj často na pitné a každodenné účely

(Batoool, 2023). Na Slovensku zatiaľ nepociťujeme vodný stres, ktorý je v niektorých častiach sveta bežný, ale za posledné roky boli zaznamenané pôdne suchá a nedostatky zrážok ako je uvedené na obrázku 1.



Obrázok 1 Graf vývoja intenzity sucha za rok 2022 v pôdnom profile 0–100 cm. V grafe sú zobrazené všetky stupne intenzity sucha a ich priestorové pokrytie v % na celom území Slovenska (Slovenský hydrometeorologický ústav, 2022).

Avšak aj keď nie sme zatiaľ priamo nútení využívať opätovne vyčistenú vodu, je vhodné aby sme mysleli na budúcnosť a boli pripravení na to, čo môže prísť. Ak chceme využiť opätovne použitú vodu, musíme brať do úvahy Nariadenie Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) 2020/741. V uvedenom nariadení sa zatiaľ uvádzajú ako sledované parametre mikrobiálne znečistenie, biologická spotreba kyslíka BSK₅, nerozpustené látky (NL) a zákal. Tu sa ale dostávame aj do problematiky pôdy a vypestovaných plodín, kde dôležité sú aj dokumenty ako Vyhláška Ministerstva pôdohospodárstva Slovenskej republiky a jej Príloha č. 7 k vyhláške č. 508/2004 Z. z. a NARIADENIE KOMISIE (ES) č. 1881/2006 z 19. decembra 2006, ktorým sa ustanovujú maximálne hodnoty obsahu niektorých kontaminantov v potravinách. Za referenčný limit pre pôdu budeme uvažovať pôdny druh piesočnatú, hlinito-piesočnatú pôdu. Limity sú v tomto prípade najprísnejšie. Napríklad v skorej spomínanej štúdii (Batoool, 2023) sledovali zalievanie pôdy s nasadenou pšenicom. Využívali na to podzemnú vodu a odpadovú vodu zo záchytnej nádrže Sahiwal, Pakistan. V tabuľke 2 sú uvedené obsahy ťažkých kovov pre jednotlivé matrice.

Tabuľka 2 Ťažké kovy a ich obsah v rôznych matriciach pri jej opätovnom použití (Batoool, 2023)

Ťažký kov [mg/kg]	Podz. voda (PV)	Odp. voda (OV)	Pôda PV	Pôda OV	Pšenica PV	Pšenica OV
Cr	0,665	0,745	1,141	1,373	1,376	1,510
Cd	1,738	1,950	2,896	3,046	1,346	1,860
Cu	0,580	0,817	1,253	2,078	1,685	2,281
Ni	1,070	1,415	2,256	2,441	0,765	1,021
Zn	1,196	9,867	0,180	1,216	2,610	3,313

Z uvedených výsledkov experimentu môžeme vidieť, že pôda aj pšenica zalievaná odpadovou vodou, obsahovala vyššie hodnoty ťažkých kovov a v prípade Cd prekročili limity podľa vyhlášky č. 508/2004 (samozrejme, vzťahnuté na podmienky Slovenska). Podľa NARIADENIA KOMISIE č. 1881/2006 by sme prekročili hodnoty limity pre kadmium v pšenici.

2 Materiál a metódy

Prevádzková jednotka (ASIO, s.r.o., Česko) bola navrhnutá tak, aby vyčistená odpadová voda (VOV) po jej kvartérnom dočistení mohla byť použitá na závlahu plodín ako cibuľa (odroda Crockett), zemiak (odroda Laura), mrkva (odroda Romance) a petržlen (odroda Efez). Na zalievanie bola použitá kvapková závlaha a žiadna iná voda okrem kvartérne dočistenej odpadovej vody nebola použitá. Odpadová voda sa vyčistila na ČOV Zeleneč a následne sa prečerpala do akumulácie nádrže. Parametre kvality vody ako mikrobiológia a základné ukazovatele boli vykonané v laboratóriách SL TAVOS, a. s. Stanovenia mikrobiológie, dusičnanov a ťažkých kovov v plodinách a pôde boli vykonané v akreditovaných laboratóriách Eurofins.

Predčistenie a koagulácia

VOV z nádrže bola prečerpávaná podávacím čerpadlom do diskového filtra Azud modular 100 (SISTEMA AZUD, S.A., Španielsko) s priemerom pórov 130 μm . Takáto predúprava vody bola určená na ochranu ďalších zariadení pred mechanickým poškodením. Úprava pH VOV sa vykonávala po prídavku koagulačného činidla PREFLOC – PIX113 (Kemifloc, a.s., Česko) pred vstupom do koagulačnej nádrže a úprava bola vykonaná podľa potreby kyselinou sírovou alebo hydroxidom sodným.

Ultrafiltrácia

VOV po koagulácii sa následne viedla na ultrafiltračnú (UF) jednotku Inge Dizzer P4040-6 (BASF, Spojené štáty americké) s veľkosťou pórov 20 nm. Prietok cez membránu bol konštantný a pri zvýšení transmembránového tlaku, systém spustil preplach, pri ktorom bol zvolený prietok v rozsahu od 50 do 100 l/m²/h.

Kolóna s aktívnym uhlím

Permeát z UF sa zadržiaval v akumulácii nádrži a postupoval do kolóny s aktívnym uhlím Aquasorb 6300 (The Jakobi Carbons Group, Sweden).

Dezinfekcia pomocou UV lampy

Po kolóne s aktívnym uhlím, čistená VOV vstupovala do kolóny s UV lampou (Aquaterm C800, Slovensko) s výkonom 65 W a maximálnym prietokom 2800 l/h. Odporúčané pracovné podmienky pre teplotu a tlak sú 2–40 °C a 7 bar. Kvartérne dočistená voda po UV dezinfekcii bola odvádzaná do akumulácie nádrže, z ktorej bola následne realizovaná periodická závlaha kvapkovou metódou.

3 Výsledky a diskusia

Obsah ťažkých kovov vo vyčistenej odpadovej vode nebol vysoký a v prípade Cr, Pb, Cd a Hg sme boli pod detekčným limitom stanovenia a to: <2 mg/l, <0,2 mg/l, <1,5 mg/l a <0,2 mg/l (tabuľka 3). V prípade Zn, Cu a Ni sme dosiahli účinnosť odstránenia viac ako 50 %, 70 % a 20 %. Vzhľadom na použité technológie, odstránenie ťažkých kovov muselo prebehnúť počas koagulácie a adsorpcie. Zníženie obsahu ťažkých kovov je dôležité aj z dôvodu UV dezinfekcie.

Tabuľka 3 Obsah ťažkých kovov v odtoku z ČOV a na závlahu

Ťažký kov	Jednotka	Odtok z ČOV	Voda na závlahu
Cr (N)	µg/l	<2	<2
Cd (N)	µg/l	<0,2	<0,2
Cu (N)	mg/l	0,048	0,013
Ni (N)	µg/l	1,96	1,53
Pb (N)	µg/l	<1,5	<1,5
Hg (A)	µg/l	<0,2	<0,2
Zn (N)	mg/l	0,046	0,021

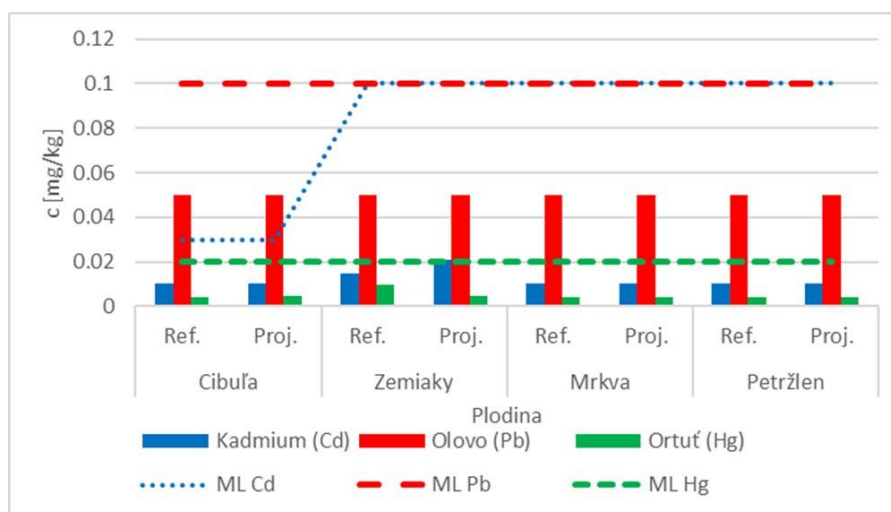
Obsah ťažkých kovov sa sledoval pre pôdu pri každej plodine a následne boli hodnoty porovnávané s referenčnou vzorkou pôdy. Ak si porovnáme hodnoty ťažkých kovov v referenčnej a projektovej pôde s vyhláškou č. 508/2004 zistíme, že ich hodnoty neprekročili limity. Jediný problém bol obsah selénu (Se) a hraničná hodnota 30 mg/kg Cu bola dosiahnutá v pôde s cibuľou. Ako si môžeme ďalej všimnúť v tabuľke 4, projektová pôda s každou plodinou oproti referenčnej obsahovala až na As a Se nižšie hodnoty ťažkých kovov. Výnimkou bola pôda pri petržlene, kde hodnota As bola nižšia v projektovej pôde. Tieto rozdiely kvality pôdy boli najväčšie pri cibuli a petržlene. Najmenej výrazné rozdiely v pôde boli zistené pri zemiakoch. Ďalej Cd vykazovalo vo všetkých pôdach hodnotu pod 0,40 mg/kg sušiny. Hodnota sušiny pôdy sa vždy držala nad hodnotou 80 %. Najvyššie hodnoty pôdnych ukazovateľov boli zaznamenané zväčša v referenčnej pôde s cibuľou, zatiaľ čo vyššie hodnoty Cr a Se boli zachytené v pôde s mrkvou. Pôda v projekte mala najvyššie hodnoty pôdnych ukazovateľov až na As a Hg pri zemiakoch.

Tabuľka 4 Porovnanie znečistenia referenčnej a projektovej pôdy, ktoré sa používali na pestovanie daných plodín

	Cibuľa		Zemiaky		Mrkva		Petržlen	
	mg/kg sušiny, % hmot (sušina)							
	Ref.	Proj.	Ref.	Proj.	Ref.	Proj.	Ref.	Proj.
Arzén	8,9	9,5	6,8	7,2	7	7,1	8,8	6,4
Chróóm	35,2	23	31,4	28,9	38	25,3	32,4	24
Kadmium	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40
Meď	30	18,7	21,7	21,5	23,1	20,5	25,3	17,8
Nikel	32,2	20,5	27,8	25,4	30,1	22,7	26,9	21,5
Olovo	17,8	12,1	14,6	13,6	17	13,1	16,1	10,8
Ortuť	0,047	0,037	0,045	0,03	0,053	0,041	0,046	0,03
pH	8,85	8,99	–	9,11	–	9,07	–	9,23
Selén	0,62	0,76	0,39	0,47	0,35	0,53	0,4	0,46
Sušina pri 105 °C	84,9	84,7	84,7	82	82,9	86,3	89,9	83,7

Jeden z najdôležitejších výsledkov tohto experimentu bolo stanovenie ťažkých kovov v daných nasadených plodinách. Na obrázku 2 sú zobrazené jednotlivé hodnoty ťažkých kovov a ich maximálne povolené limity (ML). Obsah Cd bol v porovnaní s ML v plodinách nízky. Jedine zemiaky mali zvýšený obsah Cd v referenčnej a projektovej vzorke s hodnotami 0,015 mg/kg a 0,021 mg/kg. Obsah olova bol vo všetkých vzorkách pod hodnotou 0,05 mg/kg. Tento výsledok bol aj do istej miery znepokojujúci, keďže sa jedná v podstate takmer o polovicu ML. Hg má zo zobrazených ťažkých

kovov najnižšiu hodnotu ML. V referenčnej vzorke zemiakov jej hodnota bola 0,099 mg/kg a v projektovej 0,048 mg/kg.



Obrázok 2 Obsah ťažkých kovov v pestovaných plodinách, referenčná a projektová vzorka.

4 Záver

Predložená práca sa venovala kvartérnemu dočisteniu VOV z ČOV Trnava. Špecifickým zámerom bolo poukázať na ťažké kovy pred a po dočistení vo VOV. Dočistenie bolo chemicko-fyzikálnej povahy s dezinfekciou. Cr, Cd, Pb, Hg boli vo VOV a dočistenej vode pod detekčným limitom. Maximálne limity ťažkých kovov neboli prekročené ani v pôde a to ani pri jednej plodine, avšak najvyšší obsah v projektovej pôde bol zaznamenaný pri zemiakoch. Podstatným poznatkom je, že obsah ťažkých kovov v projektovej pôde (okrem As a petržlenu) bol menší ako v referenčnej. Hodnoty ťažkých kovov Cd, Pb a Hg neprekročili v plodinách maximálne povolené limity. Obsah Cd bol výrazne vyšší len vo vzorke zemiakov. Obsah Pb sa pohyboval pod detekčným limitom. Výskyt Hg treba v plodinách pozorne sledovať z dôvodu nízkej povolenej hodnoty 0,02 mg/kg. Jej výskyt v plodinách bol zaznamenaný v malých množstvách a iba v referenčnej vzorke zemiakov bol jej výskyt vyšší s maximálnou dosiahnutou hodnotou 0,099 mg/kg. Konečným záverom tejto práce je dedukcia, že obsah ťažkých kovov v závlahovej vode, ktorá bola pripravená kvartérnym dočistením VOV nevplýva negatívne na pestovanie vybraných plodín. Výskyt ťažkých kovov bol v zalievanej pôde ešte nižší ako v referenčnej a ani pestované plodiny nemali výrazne zvýšený obsah Cd, Pb a Hg. Z tohto dôvodu opätovné použitie vyčistenej odpadovej vody má využitie, avšak dobrý monitoring a dodatočné dočistenie je tiež potrebné a nie len z dôvodu výskytu ťažkých kovov.

5 Podakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-22-0292.

6 Použitá literatúra

Almayyahi B., 2023: *Heavy Metals*. BoD – Books on Demand

Batool, F., Hussain, M.I., Nazar, S., Bashir, H., Khan, Z.I., Ahmad, K., Alnuwaiser, M.A., and Yang, H.-H., 2023: *Potential of sewage irrigation for heavy metal contamination in soil–wheat grain system: Ecological risk and environmental fate*. Agricultural Water Management, 278, 108144

Benaafi, M., Arya Pradipta, Bassam Tawabini, Al-Areeq, A.M., Abdullah Bafaqeer, Humphrey, J.D., Nazal, M.K., and Aljundi, I.H., 2024: *Suitability of treated wastewater for irrigation and its impact on groundwater resources in arid coastal regions: Insights for water resources sustainability*. Heliyon, 10, e29320–e29320

Dhokpande, S.R., Deshmukh, S.M., Khandekar, A., and Sankhe, A., 2024: *A review outlook on methods for removal of heavy metal ions from wastewater*. Separation and Purification Technology, 350, 127868

Nariadenie - 1881/2006 - EN - EUR-Lex, 2023: *Europa.eu*,. URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/ALL/?uri=CELEX%3A32006R1881> (accessed 10.27.24)

Slov-Lex, 2024: *Slov-lex.sk*,. URL <https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/2004/508/20040915.html> (accessed 10.27.24)

Slovenský hydrometeorologický ústav, and Slovenský hydrometeorologický ústav, 2022: *Zhodnotenie sucha v roku 2022 - Aktuality SHMÚ*. Aktuality SHMÚ,. URL <https://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=1299> (accessed 10.27.24).

Stormwater adaptation measures: a case study in small suburban catchment

Kostiantyn Sokolchuk

Institute of Hydrology, Slovak Academy of Sciences; Institute of Landscape Engineering, Faculty of Horticulture and Landscape Engineering, Slovak University of Agriculture in Nitra

Abstract

Urban stormwater management is essential for reducing hydrological risks during intense rainfall, especially as urban drainage systems face limitations from climate change and aging infrastructure. This study evaluates green infrastructure and other runoff reduction methods in Prešov to support small suburban water management in similar environments. The research focuses on the Nižná Šebastová district in northern Prešov, an area with a separate waste water treatment plant and a combined sewer network. Hydraulic modelling was conducted using MIKE+ software to simulate runoff from short-term rainfall events of varying intensities. In this study, key indicators for comparing the effectiveness of development scenarios include: the number of flooded nodes during rainfall events, the volume of water expected to exceed ground level and the volume of water entering the waste water treatment plant. The analysis has allowed for the ranking of the scenarios in order of increasing effectiveness, as follows: extensive green roofs, intensive green roofs, building disconnection, permeable pavements, and combined green infrastructure.

Key words: green infrastructure, urban water management, adaptation measures, flooding, MIKE+

Abstrakt

Riadenie dažďovej vody v mestách je nevyhnutné na zníženie hydrologických rizík počas intenzívnych dažďov, najmä preto, že mestské odvodňovacie systémy čelí obmedzeniam vyplývajúcim zo zmeny klímy a starnutia infraštruktúry. Táto štúdia hodnotí zelenú infraštruktúru a iné metódy znižovania odtoku v Prešove s cieľom podporiť malé prímestské vodné hospodárstvo v podobnom prostredí. Výskum sa zameriava na štvrť Nižná Šebastová v severnej časti Prešova, oblasť so samostatnou čistiarnou odpadových vôd a kombinovanou kanalizačnou sieťou. Hydraulické modelovanie sa uskutočnilo pomocou softvéru MIKE+ na simuláciu odtoku z krátkodobých zrážok rôznej intenzity. V tejto štúdii medzi kľúčové ukazovatele na porovnanie efektívnosti scenárov rozvoja patria: počet zaplavených uzlov počas dažďových udalostí, objem vody, ktorý by mal prekročiť úroveň terénu, a objem vody vstupujúcej do čistiarne odpadových vôd. Analýza umožnila zoradiť scenáre podľa rastúcej účinnosti takto: extenzívne zelené strechy, intenzívne zelené strechy, odpojenie budov, priepustné chodníky a kombinovaná zelená infraštruktúra.

Kľúčové slová: zelená infraštruktúra, vodné hospodárstvo miest, adaptačné opatrenia, zaplavenie, MIKE+.

1 Introduction

Effective urban stormwater management is one of the key challenges to ensure the sustainable functioning and development of cities. This is reinforced by the need for mitigation of hydrological risks that can potentially threaten the well-being of people and communities. These risks include

flooding of streets and raw wastewater entering natural waterways during heavy rains as a result of combine sewer overflows (further - CSO).

In urban areas, the task of risk reduction is particularly challenging. This is due to changes in runoff formation conditions, as urban areas are dominated by buildings and impervious surfaces, as well as the practice of channeling all runoff into a single network of limited volume. In addition, it is important to recognize the potential increase in the intensity of short duration rainfall events associated with global climate change. The importance of this fact is highlighted by the fact that urban drainage systems in Slovakia were designed and sized according to rainfall intensity based on data from 1955 to 1985 (Urcikán & Imriška, 1986). While the basis of the current sewerage system in Prešov is the old sewerage network from 1908, which has been extended and modernized.

The increase in meteorological extremes is also confirmed by studies in Slovakia, where the potential increase in the intensity of short-term precipitation in the 21st century may range from a few units to tens of percent (Onderka et al., 2023; Onderka & Pecho, 2023). It is reasonable to expect that an increase in the intensity of short-term rainfall will lead to an increase in the number of cases where the existing sewer network will not be able to function effectively. This problem can be approached in the framework of the need to extend the sewerage network and increase its capacity. However, this solution is expensive and not always technically feasible, and at the same time it does not address the causes of the excessive and rapid flow of water into the network.

However, there are other methods of reducing the load on the stormwater network by changing the conditions of runoff formation within the catchment area. These include, in particular, development of green infrastructure and prevention of rainwater runoff from buildings from entering the sewer system, i.e. the disconnection of the building site from the storm sewer network.

The main objective of this work was to assess the potential effectiveness of different types of green infrastructure and disconnection of buildings and to compare them within the framework of a small suburban catchment area in the city of Prešov. Identifying the risks in a small area and assessing the possibilities of mitigating the consequences of the negative hydrological phenomena mentioned above can help in the development of urban water management plans for other small municipalities. Several scenarios for the application of these methods were developed for different types of areas and compared with the current conditions.

2 Material and methods

The town of Prešov is located in the central part of eastern Slovakia and is the centre of the Prešov self-governing region. Prešov has a humid temperate continental climate. The city is characterized by significant fluctuations in precipitation depending on the month, with the maximum occurring in summer and the minimum in February-March.

The object of the study was a part of a district of Prešov called Nižná Šebastová. The study area is located in the north of the city, has a separate water treatment plant and a combined sewerage network (Figure 1). In total, there are approximately 400 households within the modelled area, with about 1000 inhabitants. The system consists of 163 nodes with a sewerage network volume of 766 m³ and includes 57 rainwater catchments with a total area of 40.5 hectares. The total area of impervious surfaces within the catchments is 10.9 ha, which translates into an average runoff coefficient of almost 0.27.

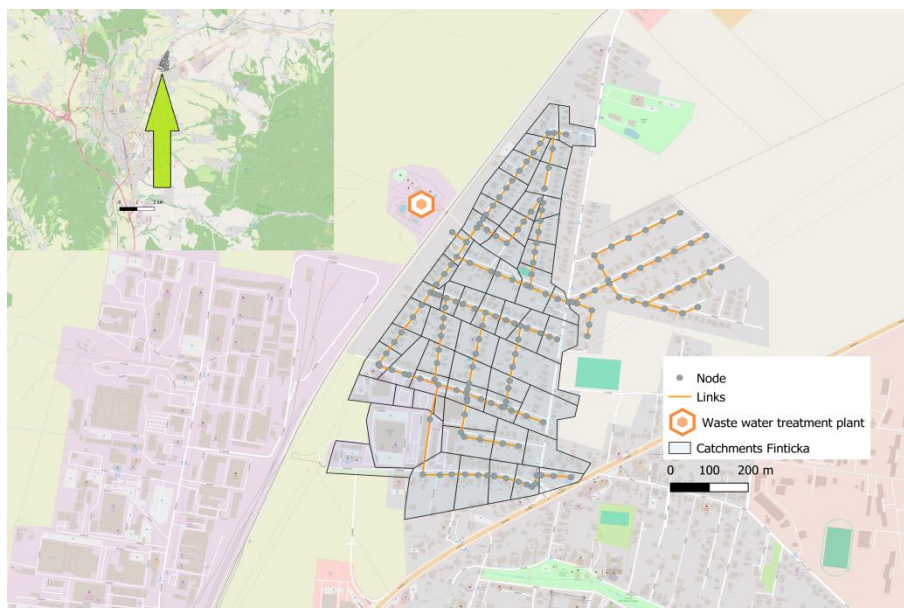


Figure 1: Location and sewerage network overview of the Nižná Šebastová district

Východoslovenská vodárenská spoločnosť, a.s. (VVS, a.s., East Slovak Water Utility, JSCo.) and DHI Slovakia, Ltd. provided the data for modeling the stormwater runoff in the urbanized part of the city of Prešov. This data set forms a comprehensive hydrological model, including node and link measurements, catchment shapes and imperviousness values. The resulting model was revised with the support of experts from DHI Slovakia, Ltd. to correct inaccuracies and incorporate more detailed sub-catchment data for the assessment of potential GI development.

The study used MIKE+ from the Danish Hydraulic Institute (DHI), software that allows for comprehensive hydrological and hydraulic modeling. QGIS was also used for data preparation and analysis.

The computational framework integrates two principal methods: the time-area-unit hydrograph and the kinematic wave method.

The Kinematic Wave Method is also applied in MIKE+ computations as a principal method for green infrastructure modelling. The platform is capable of simulating a range of green infrastructure practices at both the hydrological screening and detailed hydrological scales, thus facilitating the assessment of their impacts (DHI, 2024).

In the MIKE+ platform, green infrastructure is incorporated into the model through the definition of its parameters and the delineation of its scope within each subcatchment. The parameter values for extensive green roofs and permeable pavements were derived from previous modelling in Trebišov (Sokolchuk & Sokáč, 2024). This will enable a comparison of the effectiveness of the same measures in different conditions and at varying scales of application. The next element of green infrastructure to be analysed was intensive green roofs, with a thickness of more than 400 mm. This type was selected for a preliminary comparison with extensive green roofs. The same buildings were chosen to simulate both scenarios. According to preliminary surveys conducted on open data, it may be possible to install green roofs with different thicknesses. This analysis will facilitate a more detailed understanding of the potential benefits of installing thicker green roofs on a smaller scale.

The parameters of green infrastructure entered into the MIKE+ model for calculations are presented in tabular form in Appendix 1. In this study, flow calculation methods based on the water conductivity of green infrastructure were used as the computational approach.

In the final scenario, an initial evaluation was conducted to assess the efficiency of homeowners disconnecting their residential properties from the necessity of directing rainwater into the sewerage system. Furthermore, this practice is referred to as 'disconnection'. This is a relatively common practice, given the domestic needs of households and the necessity of paying more for sewerage services without it. A total of roughly 100 households were selected, positioned upstream from the flooded nodes. Incorporation of disconnection in the model was done by changing Reduction

coefficient of respective catchments. This reduction from the catchment in the model was changed based on the formula:

$$Kr = 0.9 - 0.6 \times \frac{Ab}{At} \quad (1)$$

where Kr - the reduction coefficient, 0.9 - standard coefficient of runoff reduction from the catchment, is applied in modeling of current conditions. 0.6 - expected efficiency of the implemented measures. Ab - the area of buildings, ha, At - total area of the respective catchment, ha.

This approach was used because it was not possible to directly incorporate disconnections into the model. However, it allows for a preliminary assessment.

The simulated scenarios and the area to which they are applied are presented in Table 2 and graphically in Figure 2.

Table 2. General description of compared scenarios of green infrastructure development

Scenario Nr.	Description	Affected area, ha	Affected area, % of total	Collecting area, ha	Collecting area, % of total
1	Current conditions, *full catchment area:	*40.51	*100	*40.51	*100
2	Identified paved areas transformed to permeable pavement	1.27	3.13	1.92	4.73
3	Preliminary suitable buildings are covered with extensive green roofs	0.86	2.11	0.86	2.11
4	Preliminary suitable buildings are covered with intensive green roofs	0.86	2.11	0.86	2.11
5	Combination of permeable pavements and intensive green roofs	2.12	5.24	2.77	6.84
6	Identified private houses prevent rain water from entering sewer network (disconnection)	1.37	3.37	1.37	3.37



Figure 2: Spatial location of the territorial changes considered in the modelled scenarios

It can be seen that in only one of the scenarios, namely the combination of the two types of green infrastructure, changes affect more than 5% of the catchment area. The disconnection, in addition, comprises an area with a value similar to that of the green infrastructure.

In order to represent a wide range of rainfall events, the intensities of short-term block rainfall, as presented in the publication by Urcikán & Imriška (1986), were implemented in the modelling scenarios. These values were also adopted by the Slovak technical standard (UNMS SR, 2016), which continues to be a valid standard. The values of these rainfall intensities for different return periods and durations of the block rains are presented in Table 3.

Table 3. Intensity of short-term rainfalls with different periodicity (return periods) in Prešov, in $\text{l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$

Periodicity / return period, years	Duration of precipitation partitions, minutes				
	15	30	60	90	120
0.5 / 2	157	102	60	42	33
0.2 / 5	193	130	79	56	44
0.1 / 10	220	150	90	66	52
0.05 / 20	245	162	99	73	59

By integrating scenarios of green infrastructure development and changes in precipitation intensity, we generated 120 distinct scenarios for comparative analysis. Of these, 20 are occurring in the current conditions, with no alterations to the urban land coverage, whereas 80 involve the utilisation of green infrastructure and 20 - disconnection of houses from storm sewer network.

In this study, for comparison of the development scenarios effectiveness the following key indicators were considered:

- the number of flooded nodes during the rainfall even
- the volume of water that is expected to exceed the surface of the ground, the maximum value at one node and the total volume above the ground of all nodes
- the volume of water that enters the water treatment plant after the storm event.

3 Results and discussion

Figure 3 presents the simulation result for one of the considered scenarios. This scenario considers the passage of extreme precipitation in current conditions, thereby enabling the estimation of the spatial distribution and the largest potentially expected values of the considered parameters. Conversely, the general pattern of the distribution of flooded points throughout the territory remains largely unaltered regardless of the severity of the rainfall event.

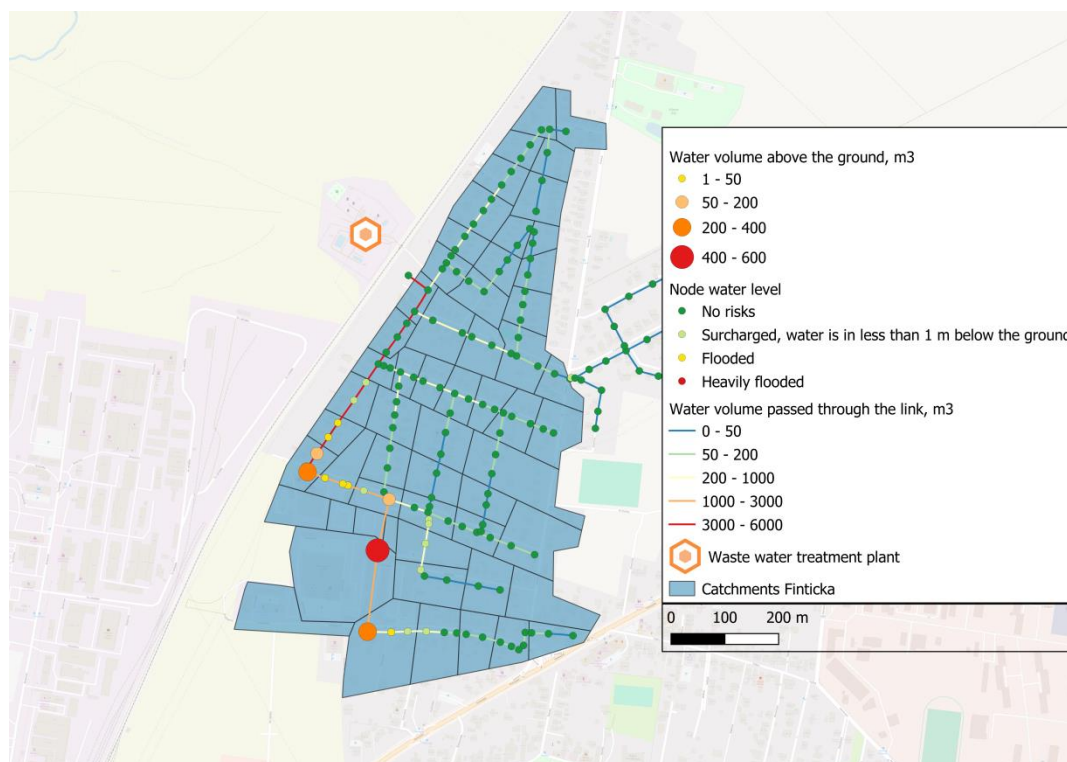


Figure 3: Node flooding and water volume distribution at Nižná Šebastová with the 60 minutes rain of 20 years frequency of occurrence

It was determined that in the area under consideration, 11 flooded points can be expected under current conditions for rainfall events with a 2-year frequency and 15 and 30 minute duration, this number decreases to 8 for 60 minute duration and 0 for longer rainfall events. The number of flooded points is predictably increasing along with the intensity of the rainfall, reaching a maximum of 20 flooded nodes for a 20-year rainfall of 15 minutes duration. This accounts for more than 15% of all 128 nodes in the combined sewer network.

However, the fact that the sewerage network is overflowing is not enough to estimate the scale of potential negative consequences. To evaluate them volume of water above the surface was analyzed. The highest total and maximum water volume above the surface occurs during a 30-minute rainfall of all periods of occurrence, followed by 60-minute and 15-minute rainfall, despite a slightly higher number of flooded nodes in the case of the latter. The total volume of water can reach more than 1700 m³, which is four times more than the same value for the least intense of the considered rains. At the same time, from 30 to 46% of this volume falls on one point, which can be seen in Figure 3. The volume of overflow water at this point can exceed 500 m³.

The anticipated changes in flood conditions are summarized in Table 4, with a portion of row values represented graphically in Figure 4. These illustrate the trends in reduction of total water volume across various development scenarios.

Permeable pavement, on average, reduces the total water volume by over 30% during short-duration rains of 15 to 30 minutes. Its effectiveness increases with longer rain durations and lower rainfall intensities, achieving nearly a 90% reduction in excess water. This approach is the most effective among all options when considered independently. The trend is consistent for peak volumes, with reductions ranging from nearly 40% to over 92%.

The next most effective measure is the disconnection of buildings, which reduces the total surface water volume by 27-87%. However, this reduction is more evenly distributed: during short-term rainfall events, the maximum water volume at a single node decreases by only 10-11%, compared to a reduction of 40-43% with permeable pavement. For prolonged rainfall events, the effectiveness of both approaches becomes more comparable.

Table 4. Reduction of total volume of water above the ground comparing with current conditions as a function of rainfall return period

Rainfall return period	Scenario	Rain duration, min				
		15	30	60	90	120
2 years	With permeable pavement (PP)	38.50	44.55	87.44	-	-
	Extensive Green roofs	10.46	10.77	19.98	-	-
	Intensive Green roofs	10.99	13.73	33.56	-	-
	With PP and Intensive GR	50.32	58.08	98.54	-	-
	Disconnection	28.67	31.68	74.09	-	-
5 years	With permeable pavement (PP)	30.67	32.80	48.88	93.63	-
	Extensive Green roofs	7.68	5.91	5.70	7.65	-
	Intensive Green roofs	8.60	9.32	15.13	36.04	-
	With PP and Intensive GR	40.09	42.62	62.85	99.96	-
	Disconnection	26.88	28.68	41.88	88.71	-
10 years	With permeable pavement (PP)	26.98	28.45	39.76	61.90	100.00
	Extensive Green roofs	4.86	4.34	3.05	2.97	-0.85
	Intensive Green roofs	6.70	7.84	11.53	19.92	49.50
	With PP and Intensive GR	34.94	36.68	51.23	78.32	100.00
	Disconnection	26.17	28.12	36.88	56.81	100.00
20 years	With permeable pavement (PP)	24.93	26.60	34.89	49.90	79.22
	Extensive Green roofs	2.92	3.34	1.77	1.09	-0.36
	Intensive Green roofs	5.80	7.01	9.73	15.03	26.75
	With PP and Intensive GR	31.74	34.02	44.91	63.79	95.51
	Disconnection	26.31	27.75	34.40	47.60	74.90

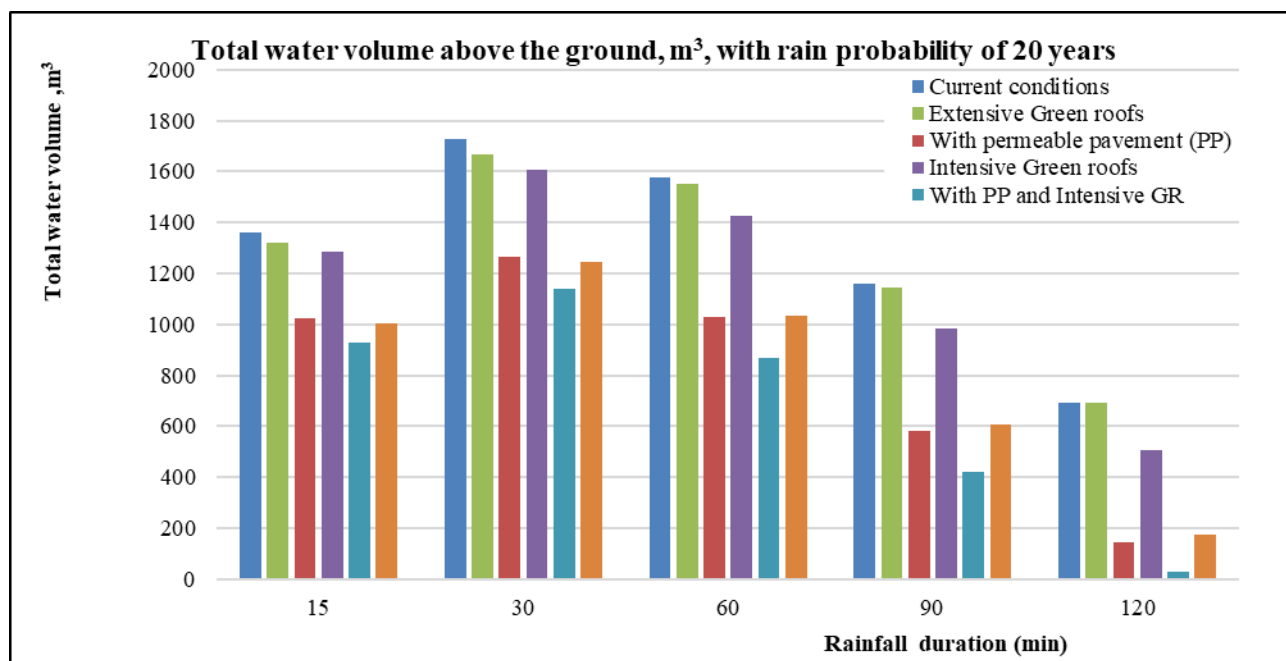


Figure 4: Total volume of water above the ground with rain frequency of occurrence 20 years

Both extensive and intensive green roofs show low effectiveness during short-term, intense rainfall. Extensive roofs can reduce the total water volume by 6-6.5%, while intensive roofs achieve a slightly higher reduction of 8-9.5%. A similar difference is observed in maximum volume reduction, with extensive roofs lowering it by 14-15% compared to 18-20% for intensive roofs. However, the effectiveness of intensive roofs remains low even during prolonged rainfall, not exceeding 8% for total volume and 15.2% for maximum volume. For 120-minute rain events, intensive green roofs can reduce the total water volume by nearly 40% and the maximum volume by nearly 48%, while effectiveness of extensive ones remains around 0-4%, on average.

According to simulations, extensive green roofs with the specified parameters do not provide a stable effect, and in some cases, even a slight increase in water volumes or the number of flooded points was observed with their use. This phenomenon may be explained by the combination of flood waves at specific points due to minor water retention on green roofs located closer to the flood epicenter; however, this requires further investigation.

The combination of permeable pavement and intensive green roofs was analyzed separately. This combination demonstrates the highest effectiveness among the methods examined, with their joint efficiency averaging no less than 39%. This scenario is, on average, 14% more effective than building disconnection and 10% more effective than permeable pavement when considering the total water volume above ground.

The next criteria examined was the volume of water that passed through the final link of the sewage network. Considering the location of the pipe and the wastewater treatment facility, it can be assumed that the collected water will be directed to waste water treatment plant (WWTP) or, in the case of existence of a combined sewer overflow not included in the provided model – directly into the waterways. In both scenarios, reducing the volume of mixed stormwater and wastewater generated in the settlement is a necessary strategy to lower treatment costs and mitigate possible threats to ecosystems and public health. Figure 5 shows the volumes of water generated within studied combined sewer network, and their change depending on the development scenario.

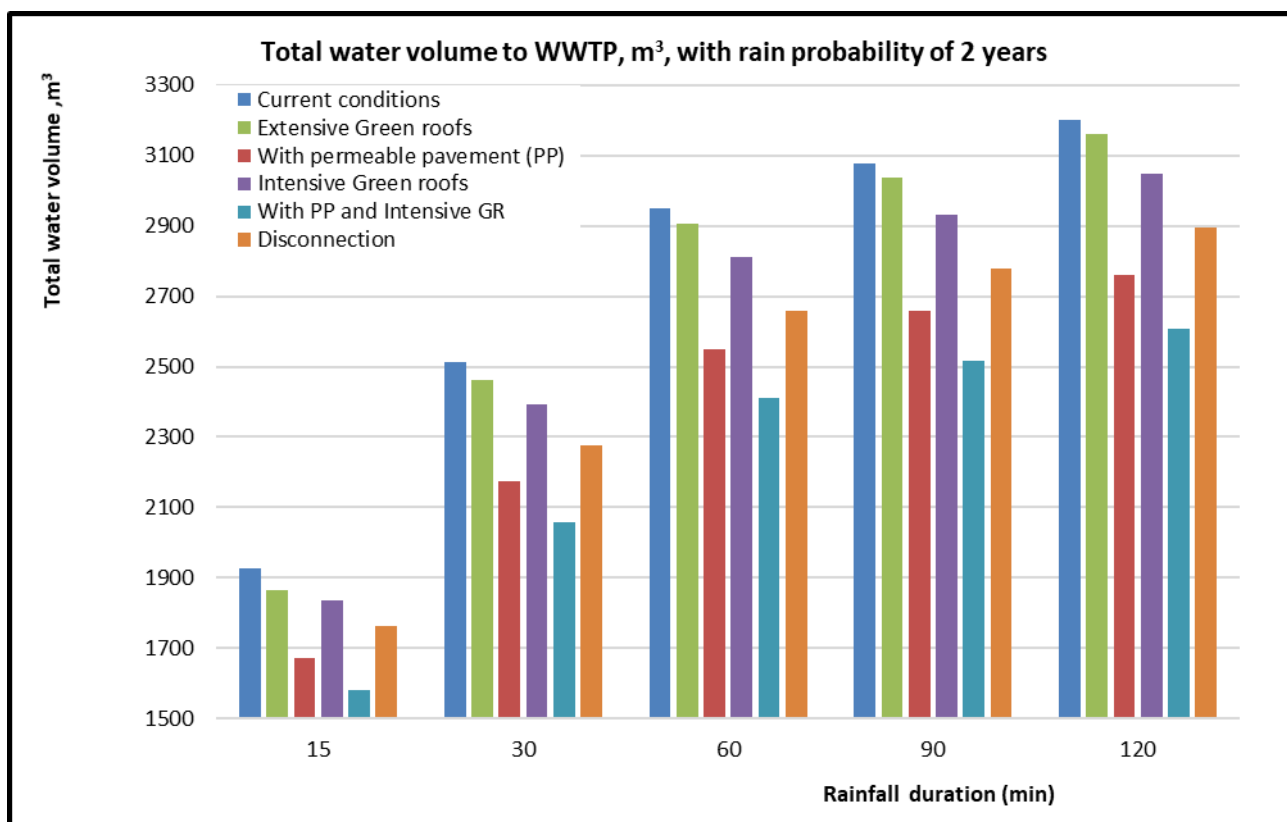


Figure 5. Total volume of water generated directed to WWTP from studied area during rainfall with frequency of occurrence 2 years

The growth of the water volume formed in the study area is synchronised with the increase in the duration of precipitation. Accordingly, regardless of the chosen frequency of rainfall, the largest volume will be generated during 120-minute rainfall. Almost 3200 m³ can be expected every two years, and almost 6000 m³ every 20 years. This value is 40-47% higher than that expected from a 15-minute rainfall.

In this case, the trends and ratios of effectiveness of different scenarios remain almost unchanged regardless of the rainfall frequency of occurrence, remaining almost unchanged for all 2, 5, 10 and 20-year rainfalls. Permeable pavements can lead to a reduction in the volume of generated water by 13-13.5%, while building disconnection can achieve an 11% reduction. Extensive green roofs have a relatively low capacity for water retention, with an average of 1% of total volume retained, that is only around 30-50 m³. In contrast, intensive green roofs demonstrate significantly greater effectiveness, achieving a reduction of nearly 4.5% compared to current conditions. The most effective scenario remains the combination of intensive green roofs and permeable pavements, which has the potential to reduce the total volume of generated water by more than 17.6%.

4 Conclusions

The studied area near Prešov, in Nižná Šebastová, comprises a diverse building environment, including residential properties with private plots and significant separated commercial areas. It was identified that during heavy, short-duration rainfall, there is a risk of sewer manhole flooding and substantial volumes of water surfacing. This suggests that the existing sewer system was likely not designed for extensive impermeable surfaces concentrated along a relatively small section of the network.

Based on the analysis, the scenarios are ranked in order of increasing effectiveness as follows: extensive green roofs, intensive green roofs, building disconnection, permeable pavements, and combined green infrastructure. Using a combination of green infrastructure could potentially reduce

the risks from more extreme, less frequent rains to the levels comparable with less extreme events. For instance, a 10-year recurrence rain event could impact infrastructure similarly to a 5-year event. This applies to both surface water volumes and the total volume generated during rainfall. Such measures would aid climate adaptation, as intense rainfall events become more frequent, while still complying with regulatory requirements for maximum design load on infrastructure.

Expanding the use of permeable pavements and wider application of disconnection, not only for residential buildings but also for commercial areas and private property, may offer higher effectiveness. Each of these measures also helps mitigate the risks from more extreme rain events to levels closer to less extreme events, particularly starting with the 10-year recurrence. Further assessment is needed to explore combinations of these measures, especially given their focus on different types of development.

The area has limited potential for green roof application, not to mention the cost associated with their implementation. Extensive green roofs with the specified parameters demonstrated low effectiveness, and the prospect of their use in suburban settings for controlling extreme rainfall events requires further detailed studies. This includes optimizing parameters, assessing the benefits of combining them with rainwater tanks and other types of green infrastructure.

5 Acknowledgement

The authors would also like to thank Východoslovenská vodárenská spoločnosť, a.s. (VVS, a.s., East Slovak Water Utility, JS Co.) for providing data for this study and to DHI Slovakia, Ltd., for provided opportunity to use MIKE + software for the research.

6 References

- Onderka, M., & Pecho, J., 2023. Návrhové hodnoty intenzít krátkodobých dažďov na Slovensku. (Design values of short-term rainfall intensities in Slovakia.). Národný Klimatický Program Slovenskej Republiky (National Climate Program of the Slovak Republic), Vol. 17/22. https://www.researchgate.net/publication/369847422_Narodny_klimaticky_program_Slovenskej_republiky_Zvazok_1722_Navrhove_hodnoty_intenzit_kratkodobych_dazdov_na_Slovensku_ISBN_978-80-99929-40-2
- Onderka, M., Sokáč, M., Pecho, J., & Mikulová, K., 2023. Digital atlas of rainfall design intensities in Slovakia. *Meteorologický Časopis*, 26, 27–38. https://www.researchgate.net/publication/372448219_Digital_atlas_of_rainfall_design_intensities_in_Slovakia
- Sokolchuk, K., Sokáč, M., 2024. Modelling the impact of green infrastructure on potential sewer flooding in the city of Trebišov, Slovakia. In *Acta Hydrologica Slovaca*, vol. 25, no.1, pp. 88-95. 2644-4690. DOI: <https://doi.org/10.31577/ahs-2024-0025.01.0010>
- UNMS SR., 2016. STN 75 6101 - Slovak technical standard: Gravity sewerage systems outside buildings (p. 64). UNMS SR - Slovak Office of Standards, Metrology and Testing.
- Urcikán, P., Imriška, L., 1986. Stokovanie a čistenie odpadových vôd. Tabuľky na výpočet stôk. (in Slovak. Sewerage and waste water treatment. Tables for sewer design.). SNTL Alfa.

Appendixes

Appendix 1. Applied parameters of green infrastructure

Type of GI	Parameter class	Parameter	Value
Extensive Green roofs	Surface	Storage depth, mm	15
		Vegetative cover	0.85
		Roughness formulation	Manning (M)
		Surface roughness, [$m^{1/3}.s^{-1}$]	4
	Soil	Thickness, mm	100
		Porosity	0.43
		Field capacity	0.4
	Conductivity	Conductivity, $mm.h^{-1}$	50
		Conductivity slope	10
	Drainage mat	Thickness, mm	30
		Porosity	0.5
		Roughness formulation	Manning (M)
		Roughness, [$m^{1/3}.s^{-1}$]	10
Intensive Green roofs	Surface	Storage depth, mm	30
		Vegetative cover	0.85
		Roughness formulation	Manning (M)
		Surface roughness, [$m^{1/3}.s^{-1}$]	0.35
	Soil	Thickness, mm	400
		Porosity	0.43
		Field capacity	0.4
	Conductivity	Conductivity, $mm.h^{-1}$	150
		Conductivity slope	10
	Drainage mat	Thickness, mm	60
		Porosity	0.5
		Roughness formulation	Manning (M)
		Roughness, [$m^{1/3}.s^{-1}$]	0.05
Permeable pavement	Surface	Storage depth, mm	1
		Vegetative cover	0.1
		Roughness formulation	Manning (M)
		Surface roughness, [$m^{1/3}.s^{-1}$]	10
	Pavement	Thickness, mm	100
		Porosity	0.15
		Permeability, $mm.h^{-1}$	700
	Storage	Height, mm	250
		Porosity	0.75
		Conductivity, $mm.h^{-1}$	100

Vplyv ozonizácie na ekotoxicitu odpadových vôd s obsahom alkylfenolových zlúčenín

Nikola Šoltýsová, Ines Vavrová

Abstrakt

Alkylfenolové zlúčeniny sú zaradené medzi prioritné látky v zozname II prílohy č.1 zákona č. 364/2004 Z.z. Za hlavný zdroj alkylfenolových zlúčenín v životnom prostredí sú považované čistiarne odpadových vôd, pretože alkylfenoly sú vo vodnom prostredí biologicky ťažšie rozložiteľné a konvenčné techniky čistenia odpadových vôd zahŕňajú práve proces aktivácie, ktorý funguje na princípe biologickej rozložiteľnosti. Z tohto dôvodu je potrebné nájsť účinnú metódu na odstránenie týchto zlúčenín. Cieľom predkladaného príspevku je overiť možnosť použitia procesov na báze ozónu pri odstraňovaní alkylfenolových zlúčenín z priemyselných odpadových vôd a overiť ekotoxikologický vplyv surovej odpadovej vody a produktov ozonizácie. Porovnali sme jednoduchú ozonizáciu a železom katalyzovanú ozonizáciu. Z výsledkov vyplýva, že oba procesy na báze ozónu sú účinné v odstránení alkylfenolových zlúčenín a znížení znečistenia charakterizovaného hodnotou CHSK avšak po ozonizácii vznikajú také produkty, ktoré majú inhibičný vplyv na klíčenie vyšších rastlín. Zjednodušený respirometrický test ukázal, že surová odpadová voda má výrazne inhibičný vplyv na mikroorganizmy aktivovaného kalu, ktorý bol po oboch procesoch ozonizácie eliminovaný.

Anotácia

V príspevku sa posudzuje vplyv dvoch typov ozonizácie na ekotocixitu priemyselnej odpadovej vody. Jednoduchá aj katalyzovaná ozonizácia boli účinne v eliminácii alkylfenolových zlúčenín a znížení hodnoty CHSK. Hodnota CHSK sa však neznížila o viac ako 50%, pričom ekotoxikologický test ukázal, že po ozonizácii vznikajú také produkty, ktoré sú síce biologicky rozložiteľné ale majú inhibíciu na vyššie rastliny, konkrétne horčicu bielu (*Sinapis alba*).

Kľúčové slová: alkylfenol, ekotoxická, horčica biela (*Sinapis alba*), ozonizácia, respirometria

Abstract

Currently, dangerous, persistent and recently identified substances are entering the ecosystem, which are included among the priority substances in list II of Annex No. 1 of Act No. 364/2004 Coll. Such substances also include a group of alkylphenolic compounds, specifically 4-nonylphenol (CAS 25154-52-3; 84852-15-3; 104-40-5) 4-octylphenol (CAS 1806-26-4) and 4-(1,1',3,3'-tetramethylbutyl)phenol (CAS 140-66-9). The greatest risks of alkylphenolic compounds are associated with their activity disrupting the endocrine system (they are registered as endocrine disruptors). These compounds were identified in all environmental matrices. Wastewater treatment plants are considered to be the main source of alkylphenolic compounds in the environment, because alkylphenols are more difficult to biodegrade in the water environment, and conventional wastewater treatment techniques include the activation process, which works on the principle of biological degradability. For this reason, it is necessary to find an effective method to remove these compounds.

Due to the fact that these pollutants occur even in very low concentrations, we are talking about micropollutants and their removal represents a relatively big challenge. Effective methods for removing micropollutants include various physicochemical techniques such as coagulation,

adsorption, membrane processes and chemical oxidation. In most of the mentioned methods, however, only contaminants are separated, while chemical oxidation can be used to transform hydrophobic organic compounds into more polar, biodegradable compounds. In the ideal case, complete mineralization of contaminants is possible. Chlorine and its compounds, ozone, potassium permanganate and hydrogen peroxide are most commonly used as oxidizing agents in the water industry. It is ozone-based processes that are coming to the fore these days and are considered advantageous technologies for removing pollutants in various environmental matrices. Ozone itself is a strong oxidizing agent, the processes do not require large amounts of chemicals, and at the same time the processes are environmentally friendly because they can be used to treat large amounts of wastewater with little or no by-product formation. In addition, it is possible to generate reactive oxygen species (ROS) from ozone, which are stronger oxidizing agents. Ozone itself reacts selectively, while ROS react non-selectively and faster. The generation of ROS is influenced by the presence of a catalyst such as Fe^{2+} , hydrogen peroxide, UV or pH value.

The aim of the presented contribution is to verify the possibility of using ozone-based processes in the removal of alkylphenolic compounds from industrial wastewater and to verify the ecotoxicological impact of raw wastewater and ozonation products. We compared simple ozonation and iron-catalyzed ozonation. The results show that both ozone-based processes are effective in removing alkylphenolic compounds and reducing COD pollution. After 90 minutes with both types of ozonation, no alkylphenolic compounds were detected. Catalyzed ozonation was 10% more effective in COD removal compared to simple ozonation (36% efficiency of simple ozonation). Despite the removal of alkylphenolic compounds, there are products after ozonation that have an inhibitory effect on the germination of higher plants. Raw wastewater had only a 14% inhibitory effect on the growth of white mustard roots, and more than 98% inhibition was shown after ozonation. For this reason, we also carried out a simplified respirometric method to assess the contaminated biological degradability and the possibility of applying activation to the treatment of the wastewater in question. A simplified respirometric test showed that raw wastewater has a significant inhibitory effect on activated sludge microorganisms that were eliminated after both ozonation processes.

Annotation

The paper assesses the impact of two types of ozonation on the ecotoxicity of industrial wastewater. Both simple and catalyzed ozonation were effective in the elimination of alkylphenolic compounds and the reduction of the COD value. However, the COD value did not decrease by more than 50%, while the ecotoxicological test showed that after ozonation, such products are created that are biodegradable but have an inhibition on higher plants, namely white mustard (*Sinapis alba*).

Key words: alkylphenol, ecotoxicity, ozonation, respirometry, white mustard (*Sinapis alba*)

1 Úvod

V súčasnosti sa do ekosystému dostávajú nebezpečné, perzistentné a nedávno identifikované látky, ktoré sú zaradené medzi prioritné látky v zozname II prílohy č.1 zákona č. 364/2004 Z.z.. Medzi takéto látky patrí aj skupina alkylfenolových zlúčenín, konkrétne 4-nonylfenol (CAS 25154-52-3; 84852-15-3; 104-40-5) 4-oktylfenol (CAS 1806-26-4) a 4-(1,1',3,3'-tetrametylbutyl)fenol (CAS 140-66-9). Najväčšie riziká alkylfenolových zlúčenín sú spojené s ich aktivitou narúšajúcou endokrinný systém (evidujú sa ako endokrinné disruptory). Tieto zlúčeniny boli identifikované vo všetkých matriciach životného prostredia. Do ekosystému sa dostávajú či už počas aplikácie vo výrobných procesoch (výroba plastov, poľnohospodárskych chemikálií, papiera, textílií) alebo ako výsledok degradácie alkylfenoletoxylátov, ktoré sa používajú ako povrchovo aktívne látky v detergentoch (Salgueiro-González et al., 2017). Avšak ako hlavný zdroj alkylfenolových zlúčenín v životnom prostredí sú považované čistiarne odpadových vôd, pretože alkylfenoly sú vo vodnom prostredí biologicky ťažšie rozložiteľné a konvenčné techniky čistenia odpadových vôd zahŕňajú práve procesy aktivácie, ktorý funguje na princípe biologickej rozložiteľnosti (Priac et al., 2017).

Vzhľadom k tomu, že tieto polutanty sa vyskytujú aj vo veľmi nízkych koncentráciách hovoríme o mikropolutantoch a ich odstránenie predstavuje pomerne veľkú výzvu. K účinným metódam na odstránenie mikropolutantov patria rôzne fyzikálno-chemické techniky ako koagulácia, adsorpcia, membránové procesy a chemická oxidácia. Vo väčšine spomenutých metód však dochádza len k separácii kontaminantov, zatiaľ čo chemickou oxidáciou je možné dosiahnuť premenu hydrofóbných organických zlúčenín na polárnejšie, biologicky odbúrateľné zlúčeniny. V ideálnom prípade je možná až úplná mineralizácia kontaminantov. Vo vodárenstve sa ako oxidačné činidlá najbežnejšie používajú chlór a jeho zlúčeniny, ozón, manganistan draselný a peroxid vodíka (Malý a Hlavínek, 1996). Práve procesy na báze ozónu sa v dnešnej dobe dostávajú do popredia a sú považované za výhodné technológie pri odstraňovaní polutantov v rôznych matriciach životného prostredia. Samotný ozón je silné oxidačné činidlo, procesy nevyžadujú veľké množstvá chemikálií a zároveň sú procesy šetrné k životnému prostrediu, pretože je ich možné použiť na spracovanie veľkého množstva odpadových vôd s malou alebo žiadnou tvorbou vedľajších produktov (Bhandari et al., 2021; Priac et al., 2017). Pri ozonizačných procesoch môže degradácia organických zlúčenín prebiehať priamym alebo nepriamym mechanizmom. Pri priamom mechanizme nastáva reakcia ozónu s organickým znečistením, zatiaľ čo pri nepriamom mechanizme sú z ozónu generované reaktívne kyslíkové častice v podobe radikálov ako sú hydroxylové, peroxylové a superoxidové radikály. Mechanizmus reakcie je možné ovplyvňovať hodnotou pH (pri $\text{pH} < 4$ je dominantný priamy mechanizmus, v neutrálnej oblasti pH prebiehajú oba mechanizmy a pri $\text{pH} > 10$ dominuje nepriamy mechanizmus) alebo prítomnosťou rôznych katalyzátorov napr. ozón v kombinácii s UV, peroxidom vodíka, železnatých iónov (Staehelin, J. and Hoigne, 1985; Derco et al., 2013).

V predkladanom príspevku sme sa zaoberali možnosťou aplikácie procesu ozonizácie na čistenie priemyselných odpadových vôd s obsahom alkylfenolových zlúčenín. Aplikovali sme proces jednoduchej ozonizácie a železom katalyzovanej ozonizácie. Predmetom skúmania bolo aj zistenie ekotoxicity surovej a prečistenej odpadovej vody a zhodnotenie výhodnejšieho procesu ozonizácie.

2 Metodika práce

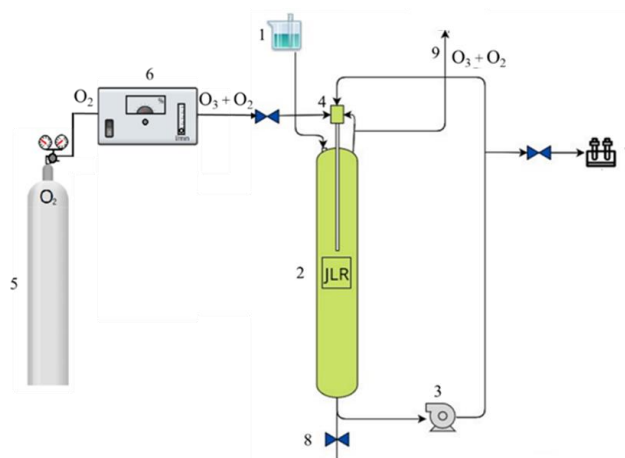
Vzorka odpadovej vody

V predkladanom príspevku sme pracovali s priemyselnou odpadovou vodou. Odpadová voda bola dodaná z priemyslu, ktorý vo výrobnom procese využíva alkylfenolové zlúčeniny. Predmetná odpadová voda mala neutrálne pH a hodnotu CHSK 1 403 mg/L. Obsah alkylfenolových zlúčenín, ktoré sú klasifikované ako prioritné látky, boli 0.36 $\mu\text{g/L}$ oktylfenolu a 0.80 $\mu\text{g/L}$ nonylfenolu.

Hodnoty CHSK a alkylfenolových zlúčenín boli stanovené v akreditovanom laboratóriu NRL, VÚVH v Bratislave.

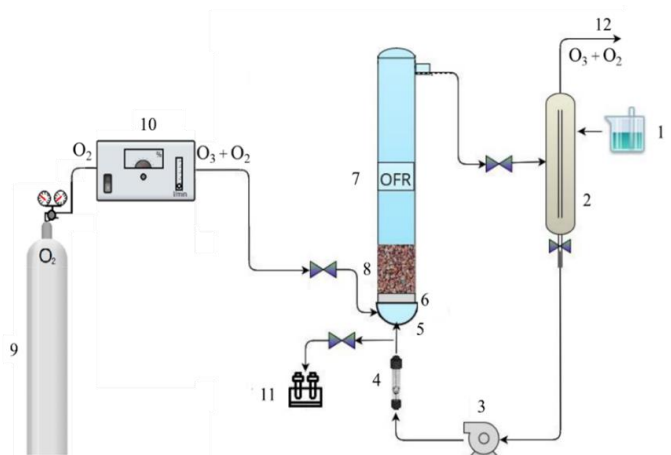
Ozonizačné zariadenia

Na prečistenie priemyselnej odpadovej vody sme otestovali dva typy ozonizácie. Prvou ozonizáciou bola jednoduchá ozonizácia, ktorú sme uskutočnili v reaktore s vonkajšou recirkuláciou zmesi (JLR). Schéma reaktora s vonkajšou recirkuláciou je na Obrázku 1. Druhou testovanou ozonizáciou bola železom katalyzovaná ozonizácia v reaktore s fluidizovanou vrstvou (FBR), ktorého schéma je na Obrázku 2. Fluidizovaná vrstva bola tvorená zeolitom, ktorého povrch bol modifikovaný železom. Prietok reakčnej zmesi vo fluidizovanej vrstve sme nastavili na 4,8 l/min. Obe ozonizácie sme uskutočnili za rovnakých podmienok ($Q_{O_2} = 0,2$ l/min, výkon generátora ozónu = 60 %, $t = 90$ min, $T = 20^\circ\text{C}$). Na každú ozonizáciu sme použili 3 litre vzorky odpadovej vody.



Obrázok 3: Schéma recirkulačného ozonizačného reaktora

(1 – dávkovanie vzorky, 2 – telo reaktora, 3 – čerpadlo na recirkuláciu zmesi, 4 – Venturiho ejektor, 5 – kyslíková tlaková fľaša, 6 – generátor ozónu, 7 – odber vzoriek z reaktora, 8 – ventil na vyprázdnenie reaktora, 9 – deštrukcia nezreagovaného ozónu)



Obrázok 4: Schéma ozonizačného reaktora s fluidizovanou vrstvou

(1 – dávkovanie vzorky, 2 – vyrovnávací nádrž, 3 – čerpadlo, 4 – prietokomer, 5 – nerezový distribútor, 6 – perforovaná platňa, 7 – telo reaktora, 8 – fluidizovaná vrstva, 9 – tlaková kyslíková fľaša, 10 – generátor ozónu, 11 – odber vzorky, 12 – deštrukcia nezreagovaného ozónu)

Účinnosť odstránenia CHSK sme vypočítali podľa rovnice (1)

$$\eta = \frac{(CHSK_0 - CHSK_{90})}{CHSK_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

kde η (%) je účinnosť odstránenia CHSK, $CHSK_0$ (mg/l) a $CHSK_{90}$ (mg/l) je počiatočná a konečná hodnota CHSK.

Test toxicity na semenách horčice bielej (*Sipapis alba*)

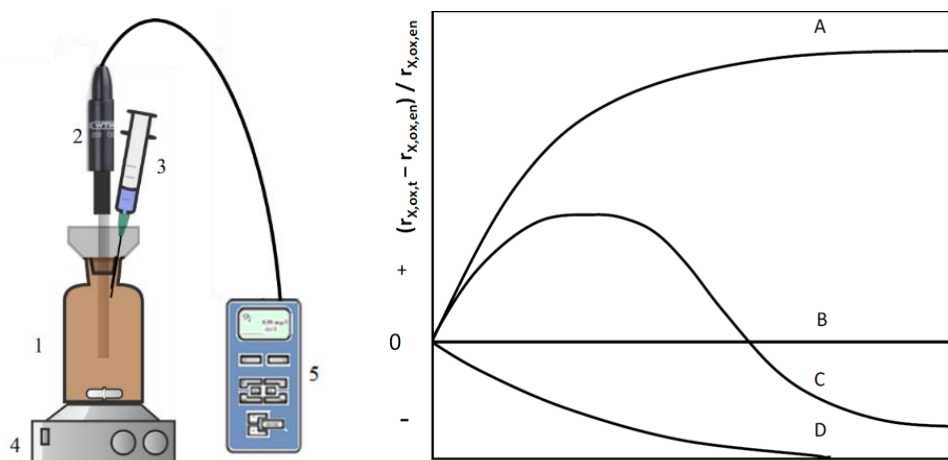
Test toxicity na semenách horčice bielej spočíva v pozorovaní inhibície rastu korenkov naklíčených semien horčice bielej. Pri tomto teste sa porovnáva dĺžka naklíčených semien, ktoré naklíčili vo vzorke odpadovej vody v porovnaní s kontrolnou vzorkou. Kontrolná vzorka predstavovala roztok makronutrientov, ktorým boli riedené aj vzorky odpadových vôd. Pre každú testovanú vzorku sme vykonali tri paralelné testy, pričom v jednom teste bolo sledovaných 30 semien horčice bielej. Test sme previedli pri laboratórnej teplote v tme po dobu 72 hodín. Mieru inhibície rastu korenkov sme vypočítali podľa rovnice (2):

$$I = \frac{(L_K - L_V)}{L_K} \cdot 100\% \quad (2)$$

kde I (%) je miera inhibície rastu korenkov horčice bielej, L_K (mm) a L_V (mm) sú dĺžky korenkov horčice bielej v kontrolnej vzorke a vo vzorke odpadovej vody (Ambrožová, 2001).

Respirometrické merania na určenie okamžitej biologickej rozložiteľnosti

Respirometrické merania s aktivovaným kalom sme realizovali v zjednodušenom respirometri (Obrázok 3). Princíp merania spočíva v meraní respirometrickej aktivity mikroorganizmov aktivovaného kalu pred a po nadávkovaní sledovanej vzorky. Pred nadávkovaním vzorky mikroorganizmy využívajú kyslík len na oxidáciu zásobných látok a bunkovej hmoty, kedy hovoríme o endogénnej respiračnej rýchlosti. V prítomnosti mimobunkového exogénneho substrátu sa endogénna respiračná rýchlosť zvýši o substrátovú respiračnú rýchlosť (nazývanú aj exogénnu respiračnú rýchlosť). Okamžitú biologickú rozložiteľnosť a toxicitu sme vyhodnotili na základe pomeru exogénnej a endogénnej respiračnej rýchlosti v závislosti od koncentrácie substrátu v respirometrickej cele podľa Obrázku č. 3. (Pitter a kol., 1983; Bodík a kol., 2016)

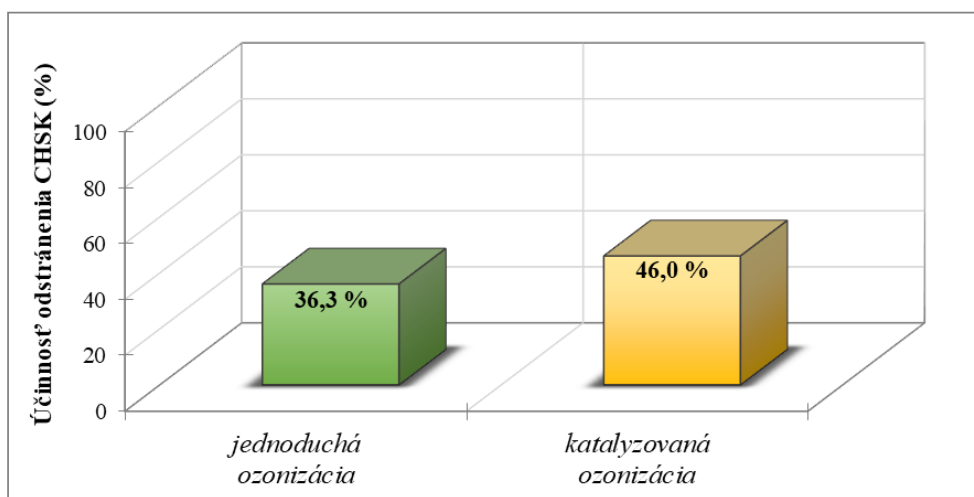


Obrázok 5: Zjednodušený respirometer (vľavo) a posúdenie okamžitej biologickej rozložiteľnosti (vpravo) (1 – respirometrická cela, 2 – kyslíková sonda, 3 – injekčná striekačka so vzorkou, 4 – magnetické miešadlo, 5 – multimeter; A – rozložiteľný substrát, B – nerozložiteľný a netoxický substrát, C – rozložiteľný substrát, pri vyšších koncentráciách toxický, D – toxický substrát)

3 Výsledky práce a diskusia

Účinnosť ozonizačných experimentov

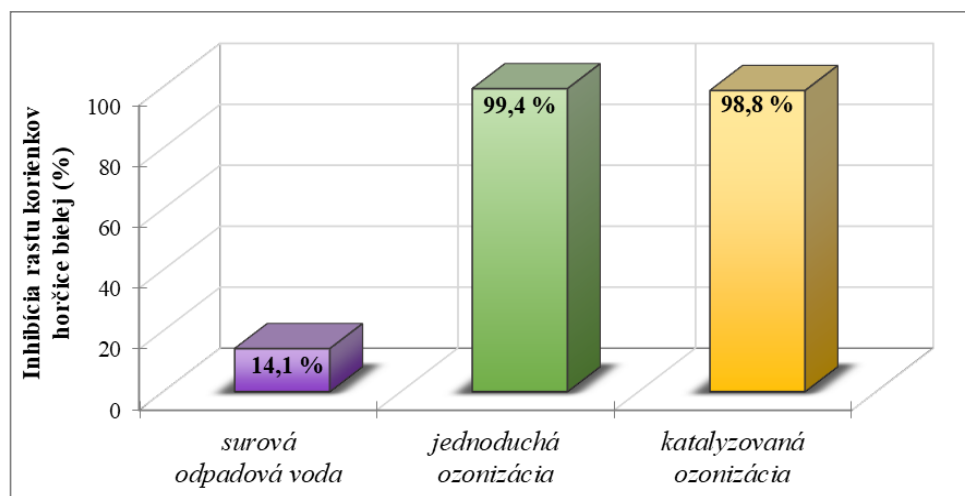
V predkladanom príspevku sme vykonali dva typy ozonizácie na odstránenie znečistenia charakterizovaného hodnotou CHSK a elimináciu alkylfenolových zlúčenín. Po 90 minútach jednoduché ozonizácie klesla hodnota CHSK na 893,2 mg/l, pričom po 90 minútach katalyzovanej ozonizácie klesla vo väčšej miere, konkrétne na 758 mg/l. Z týchto výsledkov vyplýva, že účinnosť odstránenia hodnoty CHSK jednoduchou ozonizáciou bola 36 %. Železom katalyzovaná ozonizácia bola účinnejšia o 10 % v porovnaní s jednoduchou ozonizáciou (46 % účinnosť odstránenia CHSK). Po oboch typoch ozonizácie neboli detegované alkylfenolové zlúčeniny vo vzorkách odpadových vôd.



Obrázok 6: Účinnosť odstránenia CHSK

Test toxicity na semenách horčice bielej (*Sinapis alba*)

Vykonali sme aj test ekotoxicity na vyšších rastlinách, konkrétne na semenách horčice bielej (*Sinapis alba*). Dĺžku naklíčených korenkov sme porovnávali voči kontrole, ktorú tvoril zriedený roztok makronutrientov. Testované vzorky odpadových vôd sme riedili s kontrolnou vzorkou v pomere 1:1 kvôli obsahu makronutrientov. Na Obrázku 5 je znázornená inhibícia rastu korenkov horčice bielej. Surová odpadová voda má 14 % inhibičný vplyv na rast korenkov, zatiaľ čo odpadové vody po ozonizácii vykazujú omnoho vyššiu inhibíciu rastu. Výsledky testu toxicity na semenách horčice bielej naznačujú, že ozonizáciou vznikajú také produkty reakcie, ktoré sú toxické pre vyššie rastliny.

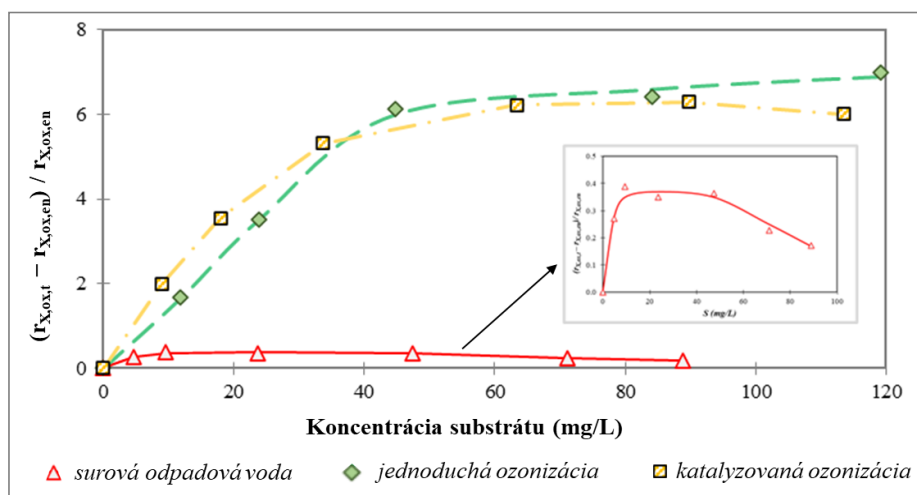


Obrázok 7: Inhibícia rastu korenkov horčice bielej (*Sinapis alba*)

Respirometrické merania na určenie okamžitej biologickej rozložiteľnosti

Zjednodušené respirometrické meranie s aktivovaným kalom sme použili na posúdenie okamžitej biologickej rozložiteľnosti, či je možné za ozonizáciou zaradiť proces biologického čistenia. Výsledky respirometrických meraní sú interpretované na Obrázku 6 a porovnávali sme ich s krivkami znázornených na Obrázku 3 vpravo. Krivka pre surovú odpadovú vodu na Obrázku 6 má tvar zhodujúci sa s krivkou C na Obrázku 3. Krivka C je charakteristická pre biologicky rozložiteľný substrát, ktorý je vo vyššej koncentrácii toxický. Surová odpadová voda je biologicky rozložiteľná ale vo vyšších koncentráciách toxická. Pravdepodobne, inhibícia endogénnej respiračnej rýchlosti nastáva už pri hodnote CHSK približne 50 mg/L. Pre takúto odpadovú vodu nie je vhodná metóda čistenia s aktivovaným kalom. Po jednoduchej ozonizácii surovej vody je krivka na Obrázku 6 podobná ku krivke A na Obrázku 3, ktorá popisuje netoxický a biologicky rozložiteľný substrát. Odpadová voda po katalyzovanej ozonizácii je biologicky rozložiteľná avšak nemôžeme jednoznačne charakterizovať toxicitu. Posledný bod v krivke pre odpadovú vodu po katalyzovanej ozonizácii na Obrázku 6 klesá, preto by bolo vhodné meranie rozšíriť aspoň o jeden bod, prípadne zopakovať meranie daného bodu aby sa potvrdilo, či ide o toxický substrát vo vyššej koncentrácii. V prípade ak by sa potvrdilo, že sa jedná o netoxický substrát oba typy predčistenia odpadovej vody by bolo vhodné zaradiť pred proces aktivácie.

Z výsledkov respirometrických meraní jednoznačne vyplýva, že po oboch typoch ozonizácie sa výrazne eliminoval inhibičný vplyv na respirometrickú rýchlosť mikroorganizmov aktivovaného kalu.



Obrázok 8: Pomer exogénnej a endogénnej respiračnej rýchlosti v závislosti od koncentrácie substrátu v respirometrickej cele

4 Záver

V predkladanom príspevku sme overili možnosť použitia procesu ozonizácie na čistenie priemyselnej odpadovej vody s obsahom alkylfenolových zlúčenín. Hlavným cieľom bolo overiť najmä ekotoxicitu pred a po procese ozonizácie. Aplikovali sme dva typy ozonizácie, v ktorých prevládali rozdielne reakčné mechanizmy. Počas jednoduchej ozonizácie v neutrálnom prostredí pH prebiehajú priame aj nepriame mechanizmy reakcie. Počas železom katalyzovanej ozonizácie by mal prevládať nepriamy mechanizmus. Z jednotlivých výsledkov vyplýva, že oba typy ozonizácie sú účinné v znížení hodnoty CHSK a odstránení sledovaných alkylfenolových zlúčenín (4-oktylfenol, 4-nonylfenol). Z testov toxicity na semenách horčice bielej je zrejmy výrazný inhibičný vplyv na rast korienkov horčice bielej vzoriek po ozonizácii, čo naznačuje, že počas ozonizácie vznikali produkty, ktoré majú toxický vplyv na vyššie rastliny. Vzhľadom na tento výrazný inhibičný vplyv sme vykonali aj respirometrické

merania na posúdenie okamžitej biologickej rozložiteľnosti a možnosti zaradenia biologického čistenia do procesu vyčistenia tejto priemyselnej odpadovej vody. Zjednodušené respirometrické testy preukázali, že po ozonizácii sú odpadové vody biologicky rozložiteľné, preto by sme v ďalšom postupe overili dlhodobjšie testy s aktivovaným kalom, či už na určenie hodnoty 5-dňovej biologickej spotreby kyslíka alebo Pitterov test, ktorým sa preukáže účinnosť odstránenia CHSK v biologickom čistení.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená programom podpory mladých výskumníkov STU s názvom projektu "*Využitie ozónu pri čistení priemyselných odpadových vôd*".

Použitá literatúra

Ambrožová, J. 2001: *Aplikovaná a Technická Hydrobiologie*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Fakulta technologie ochrany prostředí.

Bhandari, G., A.R. Bagheri, P. Bhatt, M. Bilal, 2021: *Occurrence, Potential Ecological Risks, and Degradation of Endocrine Disrupter, Nonylphenol, from the Aqueous Environment*. Chemosphere, 275, 130013.

Bodík, I. 2016. *Laboratórium Odboru II - Environmentálne Technológie*. 1. ed. Bratislava: FCHPT STU.

Derco, J., M. Valičková, K. Šilhárová, J. Dudáš and A. Luptáková, 2013. *Removal of Selected Chlorinated Micropollutants by Ozonation*. Chem. Pap. 67 (12).

Malý, J.; P. Hlavínek. 1996: *Čištění Průmyslových Odpadních Vod*; Brno : NOEL 2000.

Pitter P., F. Tuček , J. Chudoba a I. Záček, 1983: *Laboratorní metody v technologii vody*. Praha: SNTL Alfa.

Priac, A., N. Morin-Crini, C. Druart, S. Gavaille, C. Bradu, C. Lagarrigue, G. Torri, P. Winterton, G. Crini, 2017: *Alkylphenol and Alkylphenol Polyethoxylates in Water and Wastewater: A Review of Options for Their Elimination*. Arab. J. Chem. 10, S3749–S3773.

Salgueiro-González, N., I. Turnes-Carou, L. Viñas, V. Besada, S. Muniategui-Lorenzo, P. López-Mahía, and D. Prada-Rodríguez. 2016: *Occurrence of Alkylphenols and Bisphenol a in Wild Mussel Samples from the Spanish Atlantic Coast and Bay of Biscay*. Marine Pollution Bulletin 106 (1-2): 360–65.

Staehelin, J., J. Hoigne, 1985: *Decomposition of Ozone in Water in the Presence of Organic Solutes Acting as Promoters and Inhibitors of Radical Chain Reactions*. Environ. Scie. Technol. 19 (12), 1206–1213.

III. Sekcia mladých meteorológov, klimatológov a odborníkov na kvalitu ovzdušia

Tvorba mapových produktov vybraných klimatických scenárov na území Slovenska pre budúce normálové obdobia 2021-2050 a 2071-2100

Marcel Garaj

Slovenský hydrometeorologický ústav, Oddelenie klimatologickej služby

Abstrakt

V súčasnej dobe čelíme globálnej klimatickej zmene, ktorá mení klimatické podmienky na Zemi a prekonáva meteorologické rekordy doslova každý deň. Avšak tempo jej postupu je v rôznych častiach sveta odlišné. Na Slovensku a v strednej Európe, v podmienkach výrazného striedania ročných období, sú jej prejavy obzvlášť očividné. A preto je dôležité kvantifikovať zmenu klímy na Slovensku, jej priestorové rozloženie a potenciálne zmeny režimu meteorologických prvkov v budúcnosti. K dispozícii máme niekoľko voľne prístupných nástrojov, ktoré dokážu túto zmenu vyjadriť. Jednými z nich sú emisné scenáre a regionálne klimatické modely (RCMs). RCMs projektu Copernicus využívajú metódy experimentálneho koordinovaného dynamického downscalingu (CORDEX) na podklade globálnych klimatických modelov (GCMs). V tejto práci bolo použitých 5 regionálnych klimatických modelov (CNRM, ECEARTH, MOHC, MPI a NORESM), ktoré najlepšie reprezentujú podmienky strednej Európy a dokážu zachytiť jej extrémne a okrajové podmienky. Ďalej, na základe relevantných emisných scenárov (RCPs), predložená práca opisuje vývoj vybraných meteorologických prvkov a klimatických charakteristík pre 75 klimatologických staníc v sieti Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ) pre roky 2021-2100. Uvedené bodové údaje boli následne priestorovo interpolované pomocou regresného vzťahu so zohľadnením nadmorskej výšky za účelom vytvorenia gridových máp s rozlíšením 0.5km pre územie Slovenska. V práci je predložená základná štatistická analýza zmien vývoja vybraných charakteristík pre horizont blízkej budúcnosti (2021-2050) a vzdialenej budúcnosti (2071-2100) v porovnaní s referenčným obdobím (1991-2020). Výstupy práce vytvárajú novú databázu klimatických časových radov a gridových údajov SHMÚ. Tieto budú slúžiť ako podklad pre vedecké práce, krajinné plánovanie, v rozhodovacích procesoch a komerčné účely. Uvedené údajové rady budú implementované v novej pripravovanej Národnej adaptačnej stratégii Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky (MŽP SR). Verím, že vďaka nim sa Slovensko posunie bližšie k uhlíkovej neutralite a zvýši podiel obnoviteľných zdrojov na výrobe elektrickej energie.

Anotácia

Detailné poznanie priestorového rozloženia zmien chodu meteorologických prvkov a klimatických charakteristík na Slovensku je dôležité kvôli jeho komplikovanej orografii. Vzhľadom k prebiehajúcej klimatickej zmene nám tieto údaje môžu byť nápomocné pri adaptovaní a zmiernení jej dopadov v budúcnosti. Predložený príspevok objasňuje vybrané scenáre klimatickej zmeny a regionálne modely, tvorbu gridových mapových produktov a ponúka tiež ich základnú štatistickú analýzu.

Kľúčové slová: klimatické scenáre, regionálne modely, interpolačné metódy

Abstract

Nowadays, we are facing the global climate change that is modifying climate conditions all over the world and overcomes meteorological records literally every day. Although, its progress is spatially different. In Slovakia, the central Europe, with climate seasonality, is demonstration of climate change obvious. Therefore, it is necessary to quantify climate change, its spatial distribution and potential changes in regime of climate indices in Slovakia in the future. We have available several open source tools able to express the magnitude of change. There are Representative Concentration Pathways (RCPs) and regional climate models (RCMs). RCMs from Copernicus project use coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) based on global climate models (GCMs). We applied five regional climate models (CNRM, ECEARTH, MOHC, MPI a NORESM) for the purpose of our research, which represents climate conditions and extreme and boundary conditions of central Europe the most. Additionally, presented study describes the development of selected meteorological variables and climate indices for 75 stations within the network of Slovak Hydrometeorological Institute (SHMÚ) in the period 2021-2100 based on the relevant representative concentration pathways (RCPs). Final point values were spatially interpolated using multiple linear regression model considering altitude of station to create gridded products with spatial resolution 0.5km for the territory of Slovakia. Research paper includes basic statistical analyses of deviations for selected indices for the near future horizon (2021-2050) and the far future (2071-2100) in comparison with reference period (1991-2020). Outputs of presented study create new database of time series and gridded data for SHMÚ. These data will be helpful for the next scientific papers, landscape planning, in decision-making process, but also for commercial purpose. The Ministry of Environment (MŽP SR) in prepared National Adaptation Strategy for Slovakia will implement presented data. I personally believe that these results will shift Slovakia closer to the goal of carbon neutrality and increase the share of renewable sources on electricity production.

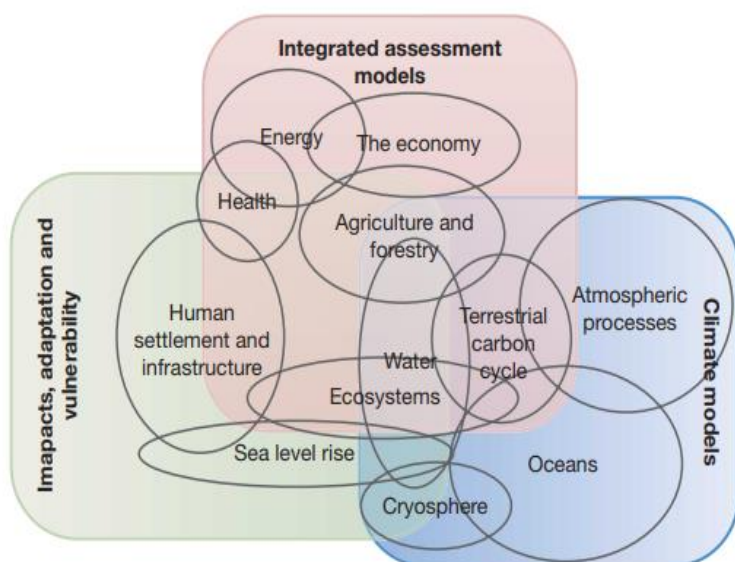
Annotation

The detailed knowledge on regime changes in spatial distribution of meteorological elements and climate indices in Slovakia is important because of its complicated orography. These data might be very useful for adaptation process and mitigating impacts in terms of the ongoing climate change. Presented paper describes elected climate scenarios and regional models, creation of gridded datasets and offers fundamental statistical analysis.

Key words: climate scenarios, regional models, interpolation methods

1 Klimatické scenáre (RCPs)

Odhad dopadov antropogénne podmienenej klimatickej zmeny sa nevyhnutne opiera o projekcie emisných scenárov (van Vuuren et al., 2011). Klimatické scenáre používané pri výskume klímy podávajú komplexnú informáciu o socio-ekonomických, technologických zmenách, zmenách vo využití krajiny a v neposlednom rade o zmenách v koncentrácii skleníkových plynov. Vedecká komunita v súčasnosti pracuje s rôznymi typmi scenárov. Táto práca využíva emisné scenáre, tzv. „Representative concentration pathways“ (RCPs), ktoré vo svojej práci prezentuje Moss et al. (2010) do roku 2100, resp. s rozšírením do roku 2300. Využíva tu synergiu integrovaných socio-ekonomických modelov v prieniku s klimatickými modelmi a hodnotením dopadov a zraniteľnosti (Obr. 1). Emisné scenáre nie sú predpoveďou, ani predikciou, ale opierajú sa o expertný konsenzus, ktorý sleduje dlhodobý trend vývoja jednotlivých častí systému. RCPs teda definujú určitý rozsah pôsobenia človeka na klimatický systém našej planéty. Pri výskume klímy poskytujú cenný zdroj informácií. Pri ich implementácii do národných politík môžu byť užitočným nástrojom pre prípravu národných adaptačných stratégií. Avšak ako uvádza Knutti & Sedláček (2012), vyplývajú z toho samozrejme určité neistoty, ktoré spočívajú najmä v neistote socio-ekonomického a technologického vývoja, environmentálnej politiky jednotlivých krajín ale aj vzájomných vzťahov jednotlivých prvkov systému.

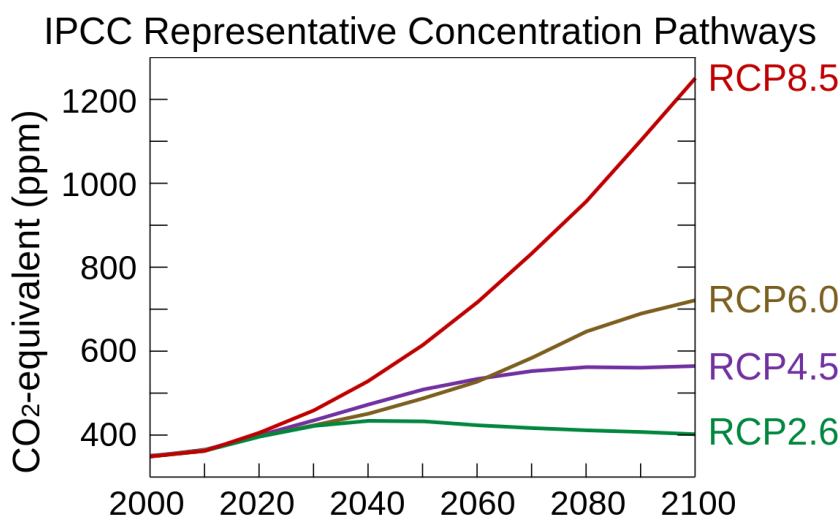


Obrázok 1: Schéma integrovaného prístupu k tvorbe emisných scenárov RCPs (Moss et al. 2010)

Na základe diskusie na pôde IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) boli navrhnuté štyri 4 základné emisné scenáre, ktoré boli neskôr verejne pripomienkované, schválené a akceptované (Moss et al. 2008). Boli odhadnuté na základe hodnôt úrovne žiarenia a koncentrácie skleníkových plynov z pred industriálnej éry. V týchto štyroch scenároch (Obr. 2) môžeme jeden označiť za tzv. optimistický, dva stabilizačné a jeden pesimistický:

- **RCP2.6** – nazývaný tiež „vrcholový“ alebo „optimistický“ scenár. Tento scenár počíta s maximom dopadajúceho žiarenia približne v polovici 21. storočia na úrovni 3.1 W/m^2 a ďalej by mala hodnota klesať do roku 2100 na 2.6 W/m^2 (Obr. 2). Jedná sa o scenár s najnižšou hodnotou radiácie, ktorý počíta s negatívnymi hodnotami emisii aj po roku 2100. Počíta tiež s postupným poklesom priemernej globálnej teploty vzduchu. Kulminácia koncentrácie CO_2 v atmosfére by mala byť približne na úrovni 490 p.p.m. pre rokom 2100. Tento scenár môže byť naplnený ak všetky štáty ratifikujú klimatické dohovory a čo najskôr dosiahnu uhlíkovú neutralitu.

- **RCP4.5** – označovaný tiež ako „*stabilizačný*“ scenár, ktorý počíta s nárastom teploty vzduchu v globálnom priemere o $+2^{\circ}\text{C}$ do roku 2050 v porovnaní s moderným klimatickým normálom do roku 2050. Následne by sa mala teplota vzduchu a koncentrácia emisií stabilizovať implementovaním klimatických politík a stratégií jednotlivých krajín. Počíta so stabilizáciou žiarenia na úrovni 4.5 W/m^2 a maximálnou koncentráciou CO_2 v atmosfére na úrovni cca 650 p.p.m. po roku 2100 (Obr. 2).
- **RCP6.0** – je rovnako považovaný za tzv. „*stabilizačný*“ scenár. V praxi je najmenej používaným keďže jeho priebeh približne kopíruje trajektóriu vývoja scenára RCP4.5 takže mu nie je venovaná príliš veľká pozornosť. Počíta však so stabilizáciou žiarenia na úrovni až 6 W/m^2 a maximálnou koncentráciou CO_2 v atmosfére na úrovni cca 850 p.p.m. po roku 2100.
- **RCP8.5** – má označenie ako tzv. „*pesimistický*“ scenár alebo „*business as usual*“ nakoľko nepočíta so žiadnou redukciou emisií skleníkových plynov. Ide o hypotetický scenár kde by sa ľudstvo držalo línie neustáleho pokroku a rastu ekonomík bez ohľadu na životné prostredie. Pri tomto scenári bude žiarenie na úrovni 8.5 W/m^2 v roku 2100 a následne bude ďalej rásť. Rovnako tak aj maximálna koncentrácia CO_2 v atmosfére bude na hodnote približne 1370 p.p.m. a po roku 2100 sa bude zvyšovať.



Obrázok 2: Vývoj koncentrácie skleníkových plynov podľa štyroch RCPs podľa IPCC do roku 2100 (zdroj: IPCC, 2008)

V predloženej práci boli použité klimatické scenáre RCP4.5 a RCP8.5 nakoľko sa z hľadiska súčasného vývoja klimatického systému a socio-ekonomických aktivít javia ako najrelevantnejšie. Pre Analýzu sme vybrali normálovú periódu blízkej budúcnosti, obdobie rokov 2021-2050 a normálové obdobie vzdialenejšej budúcnosti, roky 2071-2100. Pre tieto časové horizonty a vybrané scenáre boli vypočítané hodnoty vybraných meteorologických prvkov a charakteristík na základe piatich vybraných regionálnych modelov opísaných v nasledujúcej kapitole.

2 CORDEX a regionálne klimatické modely (RCMs)

Program Copernicus, ktorý vznikol ako iniciatíva Európskej únie a Európskej vesmírnej agentúry, pod sebou zastrešuje službu zameranú na zmenu klímy s názvom *The Copernicus Climate Change Service (C3S)*. Údaje z modelov použité v tejto práci sú voľne dostupné v rámci jedného z jeho kľúčových komponentov známeho pod skratkou CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*). Zameriava sa na prehĺbenie poznania dopadov klimatickej zmeny prostredníctvom regionálneho klimatického modelovania (Buontempo et al. 2022). Časť projektu zaoberajúca sa oblasťou Európy sa nazýva EURO-CORDEX. Ten vytvára regionálne klimatické projekcie vo vysokom rozlíšení pre zefektívnenie tvorby národných klimatických politík a manažmentu zdrojov. Súčasná generácia globálnych klimatických modelov (GCMs) má stále príliš hrubé priestorové rozlíšenie na to, aby poskytovala dostatočnú úroveň regionálnych, prípadne až lokálnych detailov. Simulácie EURO-CORDEX sú založené na štatistickom a dynamickom downscalingu GCMs:

- **Dynamický downscaling** – metóda využívajúca regionálne klimatické modely (RCMs) na produkciu klimatických údajov s vysokým priestorovým rozlíšením na podklade GCMs,
- **Štatistický downscaling** – metóda zohľadňujúca štatistické vzťahy globálnej atmosférickej cirkulácie a lokálnych klimatických podmienok odvodených z regionálnych projekcií.

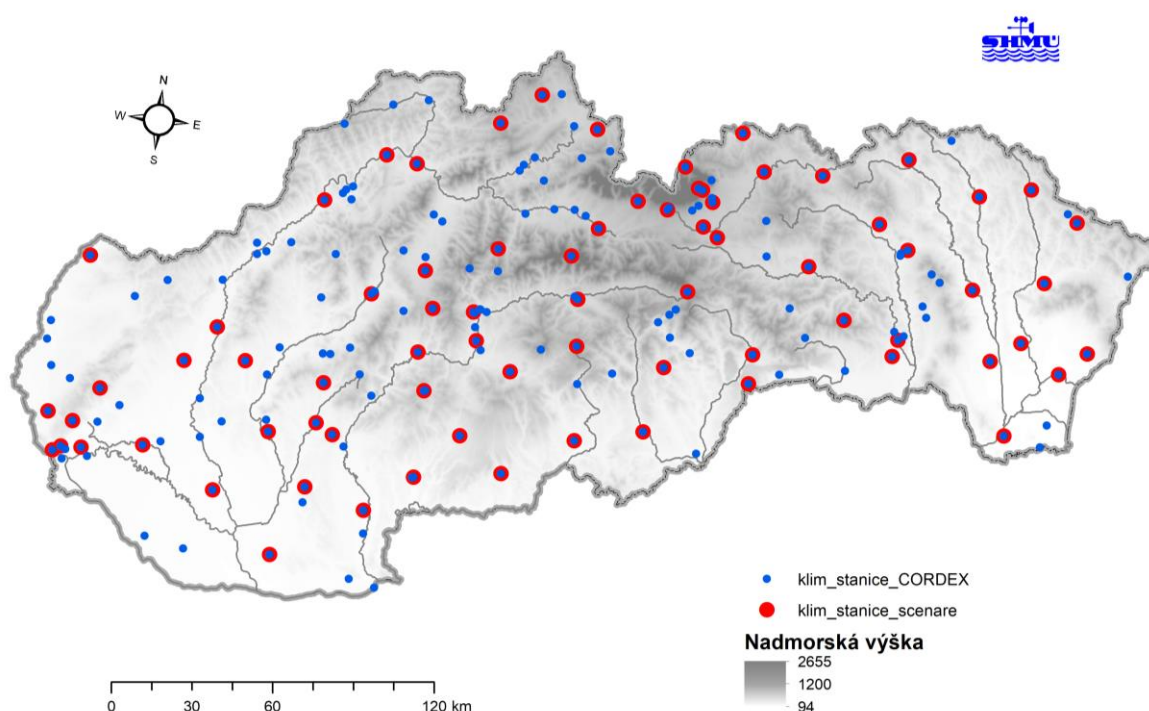
V časti EURO-CORDEX boli pripravené dva súbory modelových simulácií RCMs – jedna s priestorovým rozlíšením $0,44^\circ$ (~ 50 km) a druhá s rozlíšením $0,11^\circ$ (~ 12 km). Existuje pritom viac ako dvadsať simulácií EURO-CORDEX s priestorovým rozlíšením $0,11^\circ$.

Pre lepšie pochopenie budúceho vývoja klímy je dôležité pracovať s dostatočne veľkým súborom modelových simulácií, ako sa spoliehať len na jeden konkrétny model. Táto stratégia nám umožňuje zachytiť neistoty spojené s výberom modelu, prípadne rôznymi zdrojmi časovej a priestorovej premenlivosti. Pre potreby tohto výskumu bolo vybratých 5 nasledovných modelov, ktoré najlepšie vystihovali klimatické podmienky strednej Európy:

- 1) **MOHC** (Met Office Hadley Centre) – vyvinutý vo Veľkej Británii, model poskytuje v rámci EURO-CORDEX podkladové údaje pre regionálny downscaling a to najmä pre analýzu a zachytenie extrémnych poveternostných udalostí v Európe s rozlíšením $0,44^\circ$ (~ 50 km),
- 2) **MPI** (Max Planck Institute for Meteorology) – vyvinutý v Nemecku, tento model v sebe zachytáva model všeobecnej cirkulácie atmosféry v kombinácii s oceánickou. Vďaka tomu popisuje komplexný uhlíkový cyklus v interakcii pevnina oceán. V EURO-CORDEXe popisuje hraničné hodnoty RCMs,
- 3) **CNRM** (Centre National de Recherches Météorologiques), vyvinutý vo Francúzsku v Meteo France, ide o integrovaný model procesov prebiehajúcich na úrovni atmosféra-oceán-zemský povrch. Zahŕňa v sebe tiež komplexnú fyzikálnu parametrizáciu oblačnosti a radiácie. V rámci EURO-CORDEXu pomáha simulovať variabilitu klímy Európy podľa rôznych scenárov emisií skleníkových plynov,
- 4) **EC-Earth** – vyvinutý konzorciom európskych výskumných inštitúcií, funguje na základe vyššie spomenutých interakcií avšak navyše zahŕňa aj morský ľad. Model sa vyznačuje svojou schopnosťou simulovať dlhodobý vývoj klímy a extrémne typy poveternostných situácií,
- 5) **NorESM** (Norwegian Earth System Model) – model zameriavajúci sa na severnú Európu a Arktickú oblasť s osobitým zreteľom na vývoj plochy ľadovcov. Reprezentuje tiež okrajové podmienky v rámci EURO-CORDEXu.

3 Údajové a mapové spracovanie

Denné údaje vybraných meteorologických prvkov z týchto piatich modelov boli extrahované z rotovaných NetCDF súborov (.nc), pričom po geometrickej transformácii súradnicového systému bolo potrebné pre niektoré premenné vykonať konverziu základných jednotiek (napr. K $\rightarrow$ °C v prípade teploty vzduchu alebo kg.m – 2.s – 1 na mm/deň v prípade atm. zrážok). Následne boli gridované údaje extrahované pre súbor 75 klimatologických staníc (Obr. 3 a Príloha). Pre každý jeden bod predstavujúci meteorologickú stanicu bol vytvorený časový rad denných údajov v rámci obdobia rokov 1981 – 2100 (pre obdobie po roku 2006 boli následne počítané aj priemery vybraných meteorologických prvkov pre 30-ročné obdobia, napr. 2021 – 2050, 2071 – 2100). Na výpočet výslednej hodnoty klimatického scenára pre zvolený prvok alebo charakteristiku bol použitý medián z vyššie uvedených 5 modelov.

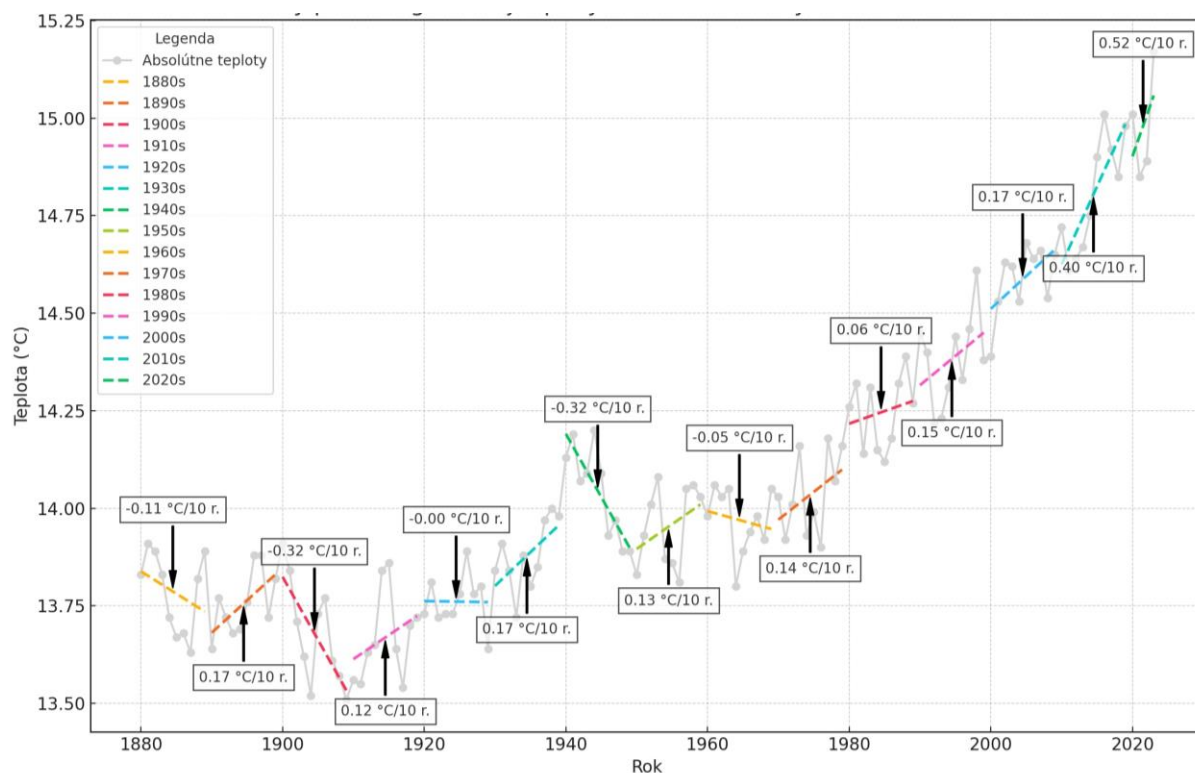


Obrázok 3: Priestorové rozmiestnenie vybraných 75 klimatologických staníc vybraných pre výpočet scenárov zmeny klímy pre vybrané prvky na Slovensku za roky 2021-2050 a 2071-2100

Na vizualizáciu hodnôt jednotlivých prvkov pre celé územie Slovenska bolo potrebné zvoliť optimálny spôsob digitálnej reprezentácie. Pre tento účel bola vybraná interpolačná metóda s názvom „Kriging with external drift“, ktorá prebiehala v prostredí skriptovacieho jazyka R. Táto priestorová interpolácia umožňuje zohľadniť vo výpočte sekundárnu, resp. „externú“ premennú, ktorou bola v tomto prípade nadmorská výška. Sekundárna premenná alebo kovariant, výrazne spresňuje výsledné hodnoty, keďže analyzované meteorologické prvky a klimatické indikátory výrazne korelujú s rastom nadmorskej výšky. Táto do výpočtu vstupovala ako digitálny model reliéfu (DMR) s horizontálnym rozlíšením 500m pre územie Slovenska. Použitá geoštatistická metóda funguje na princípe vyhľadávania regresných vzťahov medzi primárnou a sekundárnou premennou. Jej uplatnenie je široké najmä v environmentálnych a geovedných disciplínach ako sú napr. klimatológia a hydrológia a je všeobecne uznávaná vedeckými autoritami (Rivoirard, 2002). Výsledné vypočítané gridované vrstvy boli exportované v rastrovom formáte GeoTiff (.tiff) a NetCDF (.nc).

4 Výsledky

Väčšina budúcich projekcií vývoja klimatej zmeny do roku 2100 ráta s výrazným nárastom skleníkových plynov v atmosfére celosvetovo a teda aj rastom priemernej globálnej teploty vzduchu ako je tomu v posledných dekádach (Obr. 4). Tieto predikcie odzrkadľujú globálne (GCMs) aj regionálne (RCMs) podľa zvolených emisných scenárov. Európa zažíva v posledných dekádach najrýchlejšie tempo rastu teploty vzduchu z pomedzi všetkých kontinentov a dokonca dvojnásobne rýchlejšie ako je globálny priemer (EEA, 2023). Na klímu Slovenska, ktoré sa nachádza v strednej Európe, vplyva na západe prevažne oceán a na východe najmä masa kontinentu. Pri jeho polohe v miernych zemepisných šírkach dochádza k výraznému striedaniu ročných období. Komplexnosť klímy Slovenska dotvára jeho výrazná vertikálna členitosť. V súčinnosti všetkých týchto faktorov dochádza k značným rozdielom v režime klimatických prvkov na malom území v rámci Slovenska. A preto je nevyhnutné poznanie vývoja klímy do budúcnosti, aby jednotlivé regióny Slovenska boli schopné implementovať adaptačné a mitigačné opatrenia do praxe včas a vyčleniť dostatočné personálne a finančné kapacity. V tejto časti práce sú uvedené scenárové hodnoty vybraných klimatických charakteristík za normálové obdobie 2021-2050 a 2071-2100 na základe emisných scenárov RCP4.5 a RCP8.5 pre územie Slovenska.

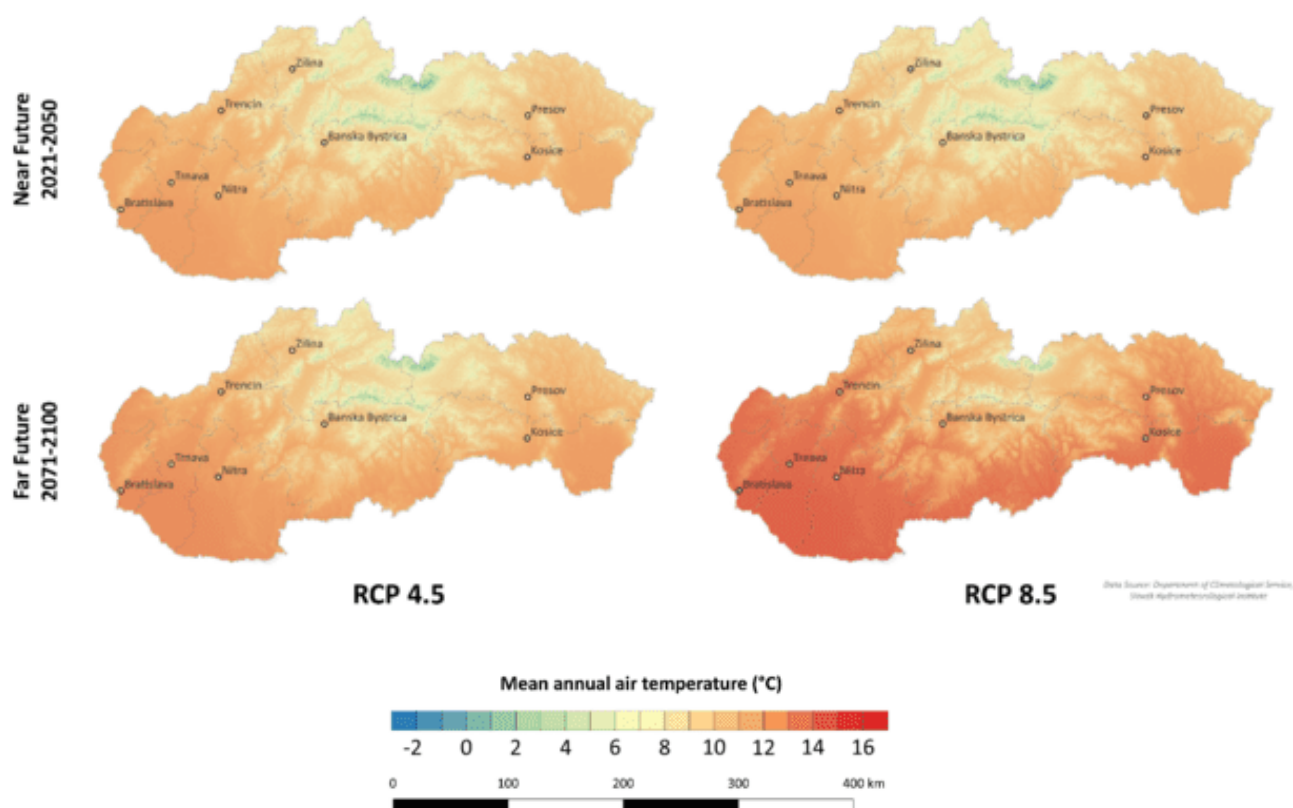


Obrázok 4: Ročný priemer globálnej teploty [°C] vzduchu a dekadné trendy v období 1880 - 2023

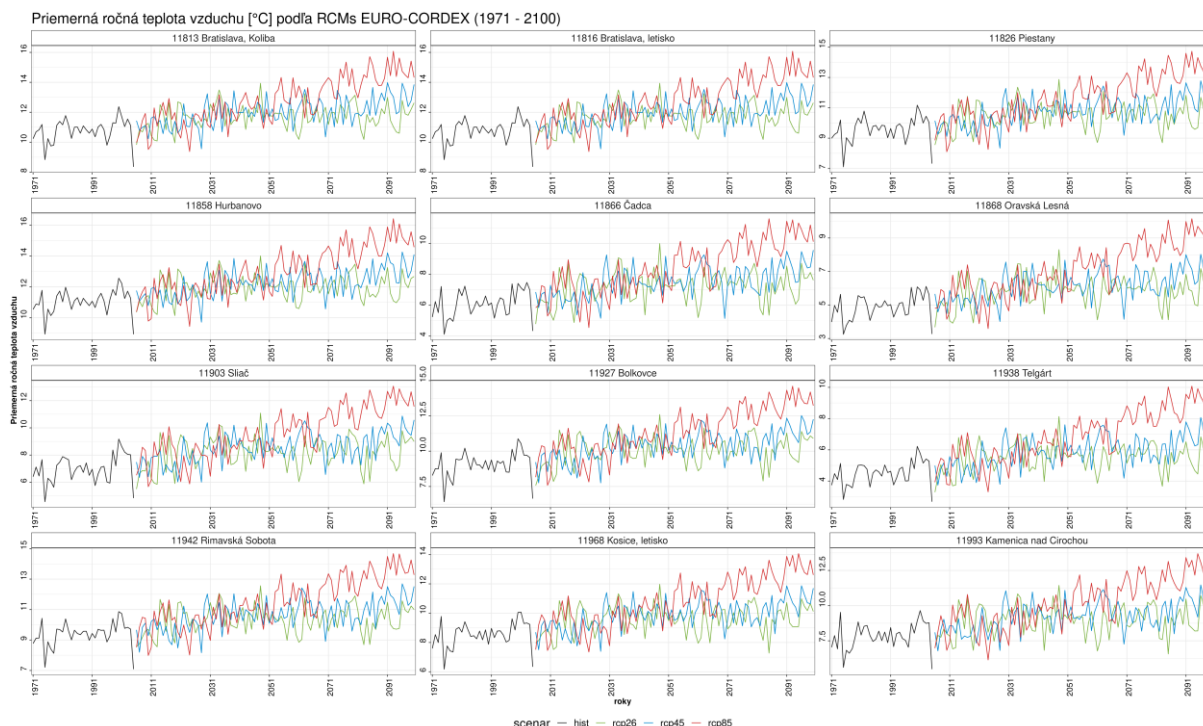
Teplota vzduchu a odvodené charakteristiky

Klimatické modely predpovedajú, že do roku 2030 by sa na juhu Slovenska mohla zvýšiť priemerná ročná teplota vzduchu o +0,7 až +0,9 °C (Obr. 5). Očakáva sa, že do roku 2050 tento vzostup dosiahne +2,0 až +3,0 °C a do roku 2100 by sa teploty mohli zvýšiť v priemere o +3,5 až +6,0 °C v závislosti od scenára RCP (Obr. 6). Očakáva sa, že minimálne teploty budú rásť rýchlejšie ako maximálne teploty. Potenciálne sa môžu minimálne denné teploty zvýšiť o +6,0 až +10,0 °C a maximálne denné teploty o +2,0 až +5,0 °C do roku 2100. Tieto prognózy môžu viesť k zníženiu dennej amplitúdy teploty vzduchu na Slovensku. Zatiaľ čo v ročnom teplotnom režime sa neočakávajú žiadne zásadné

zmeny, prechodné ročné obdobia (jar a jeseň) by sa mali otepľovať rýchlejšie v porovnaní letom a zimou. Do roku 2100 sa však očakáva zvýšenie priemerných letných teplôt vzduchu o $+1,5$ až $+4,0$ °C a zimných o $+2,5$ až $+5,0$ °C. Do roku 2050 pravdepodobne dôjde k zvýšeniu počtu letných a tropických dní spolu s poklesom mrazových a ľadových dní. Očakáva sa, že vlny horúčav budú častejšie, dlhšie a intenzívnejšie, môžu začať už v máji a pokračovať do septembra. Výskyt vln horúčav podobných tým v rokoch 2003, 2007 alebo 2015 by sa okolo roku 2050 mohol zvýšiť 3 až 5-krát. Predpokladá sa zvýšenie priemerných ročných teplôt vzduchu vo všetkých mestách, pričom výraznejšie nárasty sa očakávajú podľa scenára „business as usual“ (RCP 8.5). K tomu bude prispievať aj fenomén mestského ostrova tepla. Napríklad v Bratislave by sa v ďalekej budúcnosti (2071-2100) mohla teplota zvýšiť až o $2,8$ °C podľa RCP8.5 v porovnaní s referenčným obdobím 1991-2020. Predpokladá sa, že sa tiež zvýšenie počtu tropických dní a nocí. Bratislava by mohla mať v priemere až o 30 tropických dní viac v porovnaní s referenčným obdobím. Očakáva sa, že toto zvýšenie teploty vzduchu ovplyvní vzorce spotreby energie, čo povedie k vyšším požiadavkám na chladenie a nižším požiadavkám na vykurovanie. Očakáva sa tiež, že otepľovanie bude v celej krajine relatívne konzistentné, s malými regionálnymi odchýlkami. Za posledných dvadsať rokov došlo k poklesu denno-stupňov vykurovania a nárastu denno-stupňov chladenia, čo odráža meniace sa energetické potreby. Zmeny teplotných a zrážkových pomerov ovplyvnia charakteristiky snehovej pokrývky, tzn. zmení sa počet dní so snehovou pokrývkou a aj jej priemerná výška v závislosti od nadmorskej výšky. Vo všeobecnosti sa dá povedať, že v polohách do 1500m n. m. budú tieto charakteristiky snehovej pokrývky klesať a nad túto hranicu naopak stúpať.



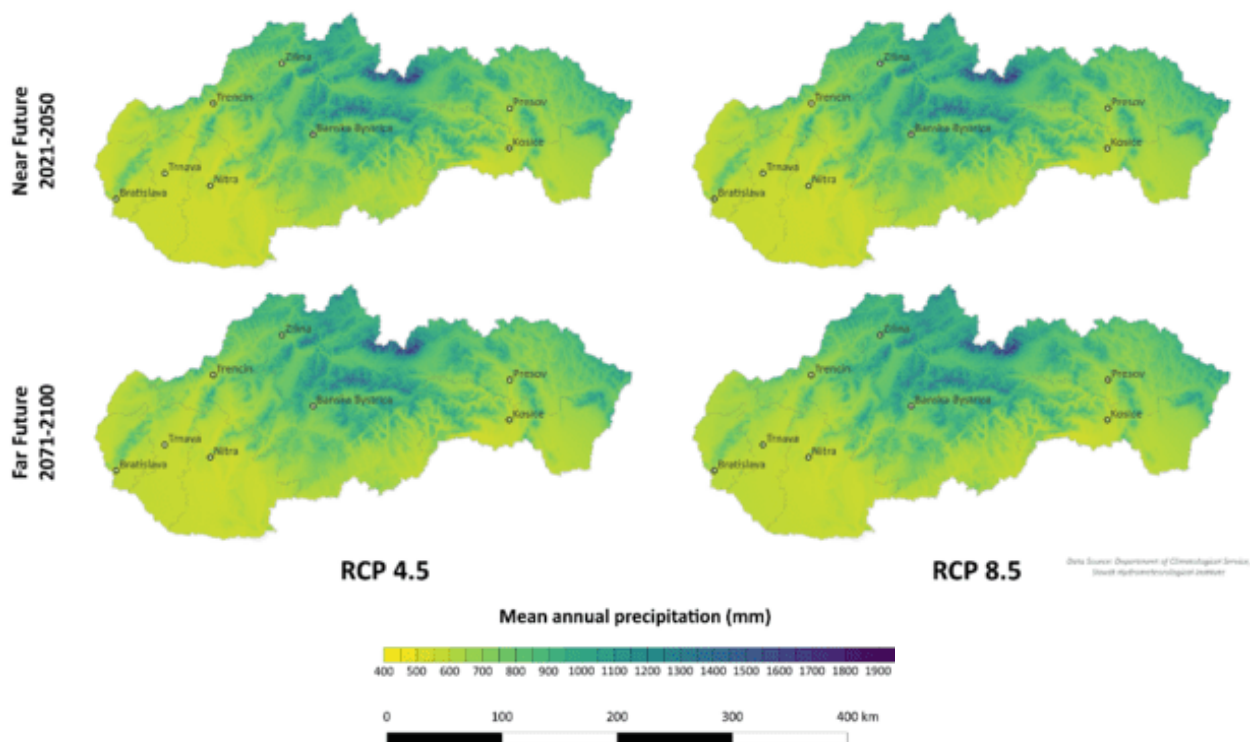
Obrázok 5: Dlhodobá priemerná ročná teplota vzduchu [°C] na Slovensku pre budúce normálové obdobia 2021-2050 a 2071-2100 podľa scenárov RCP4.5 a RCP8.5



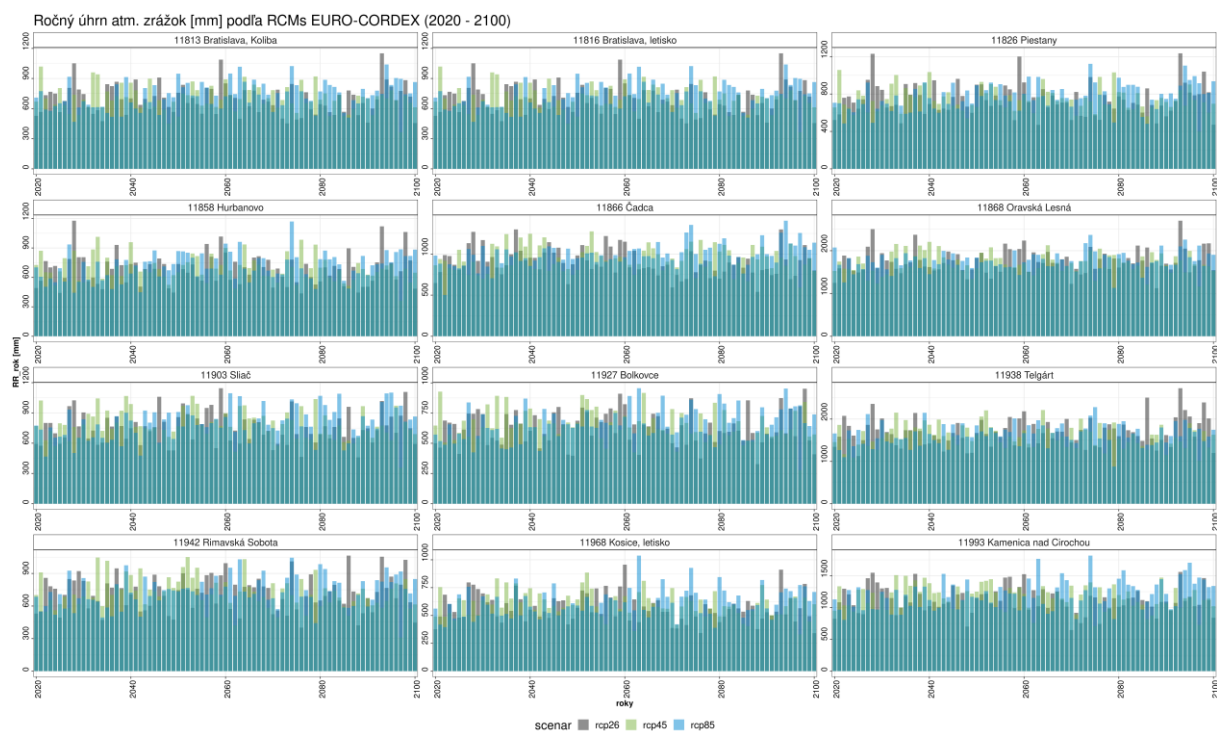
Obrázok 6: Vývoj priemernej ročnej teploty vzduchu [°C] na vybraných staniciach Slovenska pre rôzne emisné scenáre (RCPs) podľa EURO-CORDEX-u v období rokov 1971-2100

Atmosférické zrážky a odvodené charakteristiky

Režim zrážok vykazuje veľkú priestorovú variabilitu v rámci Slovenska (Obr. 7). Klimatické modely naznačujú nárast v priemerných ročných zrážkach do roku 2075 v porovnaní s rokmi 1991 – 2020 na 30% územia Slovenska. Očakáva sa, že nárast sa bude líšiť v závislosti od sezóny a regiónu, pričom zima zaznamená výraznejší nárast úhrnu zrážok v porovnaní s letom a severné regióny Slovenska zaznamenajú väčší nárast ako južná oblasť. Tieto zmeny v zrážkovom režime môžu zvýšiť vystavenie krajiny silným prívalovým dažďom na jednej strane a dlhým periódam sucha na strane druhej. Počet dní s mimoriadne intenzívnymi zrážkami ($\geq 40\text{mm}/24\text{hod}$) bude teda narastať. Zrážky s mimoriadnou intenzitou v určitých oblastiach budú viesť k častejšiemu výskytu bleskových záplav a s nimi spojených nebezpečných meteorologických javov ako sú napr. krupobitie a silné nárazové vetry, a poškodeniu infraštruktúry. Okrem toho bude pravdepodobne pribúdať počet dní s dusnom v dôsledku vyššej vlhkosti vzduchu a očakáva sa, že teplé a suché podmienky prídu skôr na jar, čo bude mať výrazne negatívny efekt na poľnohospodárstvo a vegetáciu ako takú. Predpokladá sa, že priemerné úhrny zrážok budú narastať najmä v horských oblastiach, o +10 % pri RCP4.5 a +15 % pri RCP8.5, v porovnaní s obdobím 1991-2020. To znamená ročný nárast o +50 až +70 mm pre RCP4.5 a 100 až 120 mm pre RCP8.5. Zatiaľ čo sa očakáva nárast zimných a jesenných zrážok, jarné a letné zrážky môžu klesať, čo môže potenciálne zhoršiť zrážkovú bilanciu a zvýšiť frekvenciu sucha, najmä na južnom Slovensku. V porovnaní s obdobím rokov 1991–2020 sa však očakáva, že dlhodobé priemerné ročné zrážky pre celé územie Slovenska ostanú stabilné s menšími alebo väčšími ročnými výkyvmi (Obr. 8).



Obrázok 7: Dlhodobý priemerný ročný úhrn atmosférických zrážok [mm] na Slovensku pre budúce normálové obdobia 2021-2050 a 2071-2100 podľa scenárov RCP4.5 a RCP8.5



Obrázok 8: Vývoj priemerných ročných úhrnov atmosférických zrážok [mm] na vybraných staniciach Slovenska pre rôzne emisné scenáre (RCPs) podľa EURO-CORDEX-u v období rokov 1971-2100

Záver

V analýze je evidentné, že klimatické zmeny predstavujú významnú výzvu pre Slovensko, ktorá si vyžaduje dôkladné pochopenie a precízne modelovanie budúcich podmienok. Predložená práca prispieva k získaniu relevantných klimatických informácií prostredníctvom tvorby mapových produktov na základe vybraných klimatických scenárov RCP4.5 a RCP8.5. Analýza a interpolácia meteorologických prvkov pre roky 2021-2050 a 2071-2100 sú dôležitým krokom k posilneniu kapacity pre adaptáciu a mitigáciu dopadov klimatickej zmeny. Údaje z klimatických modelov a vytvorené gridové mapy poskytujú užitočný podklad pre politiku ochrany životného prostredia a plánovanie v oblasti krajinného rozvoja. Realizácia týchto klimatických scenárov v projektoch ako je Národná adaptačná stratégia Ministerstva životného prostredia SR môže pomôcť adresovať očakávané zmeny a neistoty v oblasti hospodárenia s vodou, poľnohospodárstva a energetických zdrojov. Na záver, efektívne využitie týchto nových databáz a modelov prispeje k lepšiemu porozumeniu klimatických procesov na Slovensku a k vytváraniu stratégií, ktoré umožnia dosiahnuť cieľ uhlíkovej neutrality a zvýšiť podiel obnoviteľných zdrojov energie, čím sa Slovensko posunie k udržateľnejšej budúcnosti.

Príloha

Table 1: Zoznam klimatologických staníc použitých pre výpočet scenárových hodnôt vybraných meteorologických prvkov pre budúce normálové obdobia rokov 2021-2050 a 2071-2100

ind_kli	X_JTSK	Y_JTSK	Lat	Lon	Alt	nazov
11800	-562518	-1207472	48.81055	17.15888	163	Holíč
11810	-576597	-1279625	48.15222	17.06778	180	Bratislava, Mlynská dolina
11811	-578254	-1265173	48.28	17.02583	179	Štupava
11812	-569170	-1268798	48.25582	17.1525	584	Malý Javorník
11813	-573606	-1278191	48.16777	17.10583	287	Bratislava, Koliba
11816	-566053	-1278672	48.17027	17.20751	133	Bratislava, letisko
11817	-543122	-1277847	48.19777	17.51333	123	Kráľová pri Senci
11819	-527693	-1246454	48.49194	17.68055	178	Jaslovské Bohunice
11820	-517124	-1294517	48.07027	17.88195	112	Žihárec
11826	-515341	-1234075	48.61305	17.83167	163	Piešťany
11833	-558918	-1256754	48.37277	17.27389	530	Modra, Piesok
11841	-452274	-1170397	49.23249	18.61416	309	Dolný Hričov
11846	-504928	-1246588	48.50944	17.9875	182	Veľké Ripňany
11849	-475882	-1254821	48.45832	18.38861	319	Žikava
11850	-482831	-1293381	48.1075	18.33916	145	Podhájska
11855	-496382	-1272928	48.28027	18.13389	135	Nitra, Veľké Janíkovce
11856	-472557	-1274007	48.28888	18.455	261	Mochovce
11858	-495935	-1318481	47.87249	18.19305	115	Hurbanovo
11862	-475460	-1187062	49.06583	18.31639	255	Beluša
11865	-441067	-1173653	49.21138	18.7711	358	Žilina
11867	-458015	-1221808	48.7675	18.59306	260	Prievidza
11868	-409898	-1158567	49.36805	19.1825	785	Oravská Lesná
11874	-373568	-1197664	49.04027	19.7175	640	Liptovský Hrádok
11876	-358894	-1187513	49.13999	19.90889	978	Podbanské
11879	-435214	-1227249	48.73499	18.90805	763	Kremnické Bane
11880	-442378	-1289735	48.16972	18.87694	139	Dudince
11881	-460976	-1302076	48.04583	18.64111	137	Želiezovce
11882	-478622	-1269653	48.32333	18.36861	190	Tesárske Mlyňany
11890	-394509	-1148099	49.47194	19.38361	757	Oravské Veselé
11897	-437994	-1213277	48.85832	18.85556	520	Turčianske Teplice
11898	-420030	-1228591	48.73333	19.11528	429	Banská Bystrica, Zelená
11900	-440745	-1243455	48.58582	18.85028	262	Žiar nad Hronom
11901	-438462	-1257728	48.45944	18.89612	622	Banská Štiavnica
11902	-425151	-1274419	48.31888	19.0925	352	Bzovík
11903	-419037	-1239196	48.63888	19.13944	313	Šliač
11904	-406488	-1250738	48.5436	19.32055	365	Vígfaš, Pstrúša
11905	-409869	-1288458	48.20305	19.31166	192	Dolné Plachtince
11908	-410871	-1205142	48.94972	19.21611	605	Liptovská Osada
11910	-381711	-1241231	48.64444	19.64667	1015	Lom nad Rimavicou
11916	-383666	-1207786	48.94332	19.58916	1995	Chopok
11917	-381293	-1223892	48.80027	19.63638	485	Brezno
11918	-373945	-1160950	49.36944	19.67861	692	Liesek
11927	-382602	-1276307	48.32916	19.66667	187	Boľkovce
11930	-336374	-1182757	49.19527	20.21305	2635	Lomnický štít
11931	-334877	-1183497	49.18944	20.23417	1763	Skalnaté Pleso
11933	-347882	-1190686	49.11778	20.06223	1323	Štrbské Pleso
11934	-334572	-1197039	49.06805	20.24944	694	Poprad
11936	-341262	-1174816	49.26388	20.13945	1017	Tatranská Javorina
11938	-340455	-1221088	48.84899	20.189	906	Telgárt
11941	-349347	-1249118	48.59249	20.09167	312	Ratková
11942	-356990	-1272995	48.37388	20.00862	215	Rimavská Sobota
11944	-316311	-1244415	48.65222	20.53528	311	Rožňava
11949	-295474	-1211831	48.955	20.79445	388	Spišské Vlachy
11950	-311989	-1176749	49.26194	20.5425	566	Podolíneč
11951	-319909	-1162344	49.38721	20.42249	469	Červený Kláštor
11952	-329350	-1201032	49.03499	20.324	703	Gánovce
11955	-258581	-1205799	49.02555	21.29389	295	Prešov, vojsko
11957	-331105	-1187962	49.15138	20.28945	806	Stará Lesná
11958	-282354	-1231652	48.78304	20.98694	1242	Kojšovská hoľa
11960	-262244	-1239056	48.72527	21.26499	207	Košice, mesto
11961	-290174	-1178113	49.26027	20.84278	485	Plaveč nad Popradom
11962	-258162	-1172203	49.32749	21.27834	335	Bardejov
11963	-269160	-1196147	49.10777	21.14305	402	Jakubovany
11966	-234492	-1220524	48.90277	21.63139	140	Čaklov
11968	-264468	-1245044	48.67055	21.23861	230	Košice, letisko
11970	-317820	-1255189	48.55471	20.52305	524	Silica
11976	-231954	-1185909	49.21472	21.64638	216	Tisinec
11977	-212594	-1183310	49.24499	21.91056	306	Medzilaborce
11978	-227977	-1246915	48.66804	21.73472	104	Milhostov
11979	-222837	-1274506	48.42194	21.81916	97	Somotor
11982	-216562	-1240224	48.73221	21.88611	109	Michalovce
11984	-191814	-1244149	48.70499	22.22417	120	Orechová
11992	-195661	-1195645	49.13971	22.14889	380	Osadné
11993	-207786	-1218021	48.93471	21.99417	176	Kamenica nad Cirochou
11995	-202460	-1251813	48.63277	22.08334	105	Vysoká nad Uhom

Literatúra

Buontempo, C., Burgess, S. N., Dee, D., Pinty, B., Thépaut, J.-N., Rixen, M., Almond, S., Armstrong, D., Brookshaw, A., López Alos, A., Bell, B., Bergeron, C., Cagnazzo, C., Comyn-Platt, E., Damasio-Da-Costa, E., Guillory, A., Hersbach, H., Horányi, A., Nicolas, J., Obregon, A., Penabad Ramos, E., Raoult, B., Muñoz-Sabater, J., Simmons, A., Soci, C., Suttie, M., Vamborg, F., Varndell, J., Vermoote, S., Yang, X., & Garcés de Marcilla, J. (2022). The Copernicus Climate Change Service: Climate Science in Action. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(E2669–E2687). <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0315.1>

EEA (Ed.) (2024): Biodiversity Information System for Europe - Slovakia. Dostupné online na: <https://biodiversity.europa.eu/countries/slovakia>.

IPCC (2008) Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. IPCC Expert Meeting Report on New Scenarios, Noordwijkerhout, Intergovernmental Panel on Climate Change

Knutti, R., & Sedlacek, J. (2013). "Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections." *Nature Climate Change*, 3(4), 369-373.

Moss R, Babiker M, Brinkman S, Calvo E, Carter T, Edmonds J, Elgizouli I, Emori S, Erda L, Hibbard KA et al (2008) Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. IPCC Expert Meeting Report on New Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, Noordwijkerhout

Moss, R. H., et al. (2010). "The next generation of scenarios for climate change research and assessment." *Nature*, 463(7282), 747-756.

Rivoirard, Jacques. (2002) On the Structural Link between Variables in Kriging with External Drift. *Mathematical Geosciences*, Springer, October 2002, Volume 34, Issue 7, pp 797 - 808

van Vuuren, D. P., et al. (2011). "The representative concentration pathways: an overview." *Climatic Change*, 109(1-2), 5-31.

Vplyv meteorologického sucha na výnosy vybraných poľnohospodárskych plodín v rokoch 2000-2022

Zuzana Jutková

Abstract

Drought is one of the key manifestations of climate change, with a significant impact on agricultural production. This study focuses on analysing the effects of meteorological drought on the yields of selected agricultural crops (corn, potatoes, spring barley, winter rapeseed, winter wheat, and sunflower) in the NUTS2 regions of Slovakia from 2000 to 2022. To assess the sensitivity of crops to drought, a three-month standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI-3) was used to calculate correlations with crop yields. The results reveal significant regional differences in the impact of drought on crops, with the most severe negative effects observed in the southern regions of Slovakia. Significant correlations between water deficiency and yield reduction were found, particularly during critical vegetative months. These findings provide important insights for designing agricultural adaptation strategies to mitigate the negative consequences of climate change.

Annotation

This paper analyses the impact of drought on the yields of selected agricultural crops (maize, potatoes, spring barley, winter rape, winter wheat and sunflower) in the NUTS2 regions of Slovakia from 2000 to 2022. Using the correlation coefficient, it evaluates the sensitivity of crops to drought during whole growing season in various regions, with the most significant effects of drought observed in the southern areas. The findings provide important data for improving future adaptation strategies in agriculture.

Keywords: SPEI, correlation coefficient, drought, agriculture, yield.

Anotácia

Táto práca analyzuje vplyv sucha na úrodu vybraných poľnohospodárskych plodín (kukurica, zemiaky, jačmeň jarný, repka ozimná, pšenica ozimná, slnečnica) v NUTS2 regiónoch na Slovensku v rokoch 2000–2022. Prostredníctvom korelačného koeficientu hodnotí citlivosť plodín na suchu počas celého vegetačného obdobia v jednotlivých regiónoch, pričom najväčšie vplyvy sucha boli zaznamenané v južných oblastiach. Výsledky poskytujú dôležité údaje pre zlepšenie budúcich adaptačných stratégií v poľnohospodárstve.

Kľúčové slova: SPEI, krelačný koeficient, sucho, poľnohospodárstvo, úroda

1. Úvod

Klimatická zmena patrí medzi najväčšie globálne problémy súčasnosti. Jedným z jej najintenzívnejších dôsledkov je práve sucho, ktoré sa v posledných rokoch čoraz intenzívnejšie prejavuje aj na území Slovenska (Labudová et al. 2024). Účinky tohto fenoménu sú pozorovateľné naprieč rôznymi hospodárskymi odvetvami. Výrazne však zasahujú poľnohospodársku produkciu, ktorá zohráva dôležitú úlohu v ekonomike štátu, v potravinovej bezpečnosti a v udržaní hospodárskej stability. Keďže ide o jav, ktorý ovplyvňuje každodenný život ľudí, vzniká množstvo štúdií zameraných práve na túto problematiku.

Pojem sucha je náročne jednoznačne definovať keďže ide o komplexný jav (Mishra, Singh 2010). Rozlišujeme niekoľko typov sucha. Meteorologické sucho, ktoré sa určuje rozdielom v množstve zrážok a normálovej hodnoty za nejaké časové obdobie. Poľnohospodárske sucho, nastáva vtedy, ak je v pôde nedostatok vlhky pre poľnohospodárske plodiny. Ďalším typom sucha je hydrologické sucho, počas ktorého dochádza k významnému poklesu vodnej hladiny vo vodných tokoch. Napokon

socioekonomické sucho je jav, ktorý ma dopady na kvalitu života ľudí v postihnutých oblastiach (Wilhite 2005).

V tejto práci sa budeme zaoberať predovšetkým meteorologickým suchom a dôsledkom jeho vplyvu na poľnohospodársku produkciu. Česká meteorologická spoločnosť (1993) meteorologické sucho definuje najmä ako deficit zrážok v porovnaní s klimatickým normálom, pričom kľúčovú úlohu zohráva výpar.

Jedným z najčastejšie používaných nástrojov na hodnotenie sucha je štandardizovaný index evapotranspirácie zrážok (SPEI), ktorý sme použili aj na účely analýzy v tomto príspevku. SPEI sa líši od iných indexov sucha tým, že zohľadňuje nielen zrážky, ale aj evapotranspiráciu, teda množstvo vody, ktoré sa vyparí z povrchu pôdy a rastlín. Tento prístup umožňuje presnejšie sledovať vodnú bilanciu, najmä v súvislosti so zvýšenými teplotami.

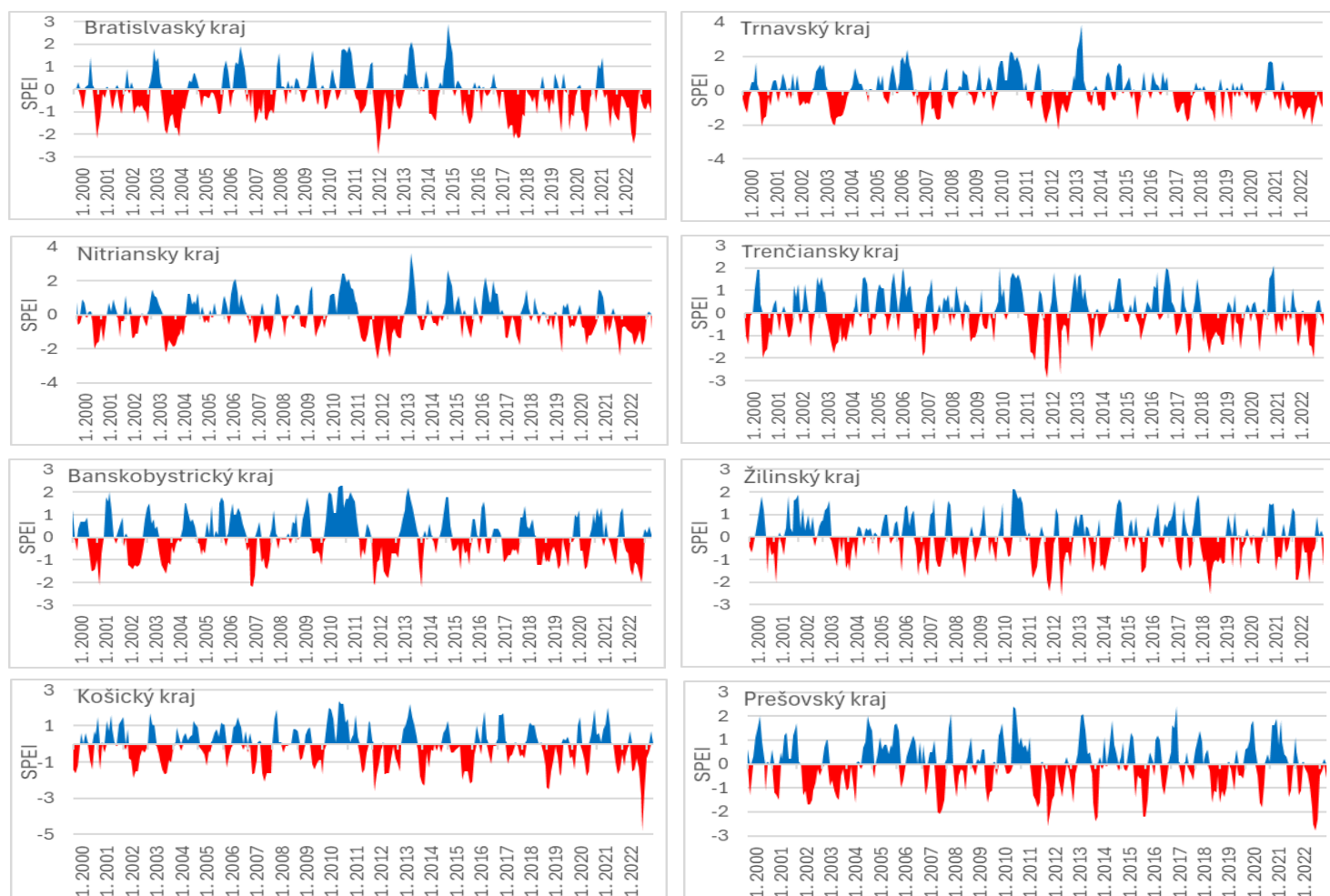
Cieľom práce bolo analyzovať, aký má sucho vplyv na úrodu vybraných poľnohospodárskych plodín (kukurica, zemiaky, jačmeň jarný, pšenica zimná, repka olejná, slnečnica) a ako sa tieto hodnoty líšia v NUTS2 regiónoch na Slovensku za obdobie rokov 2000 - 2022. Na tento účel sme použili korelačnú analýzu medzi výnosmi plodín a SPEI. Taktiež sme sledovali, v ktorých oblastiach sú tieto zmeny najvýraznejšie.

2. Metodika

Pri tvorbe tohto príspevku sme vychádzali z dát štandardizovaného zrážkového a evapotranspiračného index (SPEI), ktorý pracuje s hodnotami vodnej bilancie, na základe rozdielu medzi zrážkami a evapotranspiráciou a výsledky porovnáva s posledným normálovým obdobím 1981-2010. Tento index je široko používaný pre hodnotenie sucha, pretože zohľadňuje nielen nedostatok zrážok, ale aj zvýšené teploty, ktoré môžu zvyšovať evapotranspiráciu (Vicente-Serrano et al. 2010).

Na výpočet a grafické zobrazenie údajov sucha sme použili tento index, ktorý berie do úvahy trojmesačnú kumulatívnu dobu (SPEI-3). To znamená, index pre konkrétny mesiac ukazuje stav vodnej bilancie pre daný a predchádzajúce dva mesiace, pričom na celé časové obdobie dátového radu sa používa tzv. „klzavé okno“. Trojmesačný interval sme si zvolili, pretože poskytuje vyváženejší obraz a eliminuje extrémny, ktoré by mohli byť viditeľné pri mesačných hodnotách, a zároveň poskytuje detailnejší priebeh než dlhšie časové obdobia ako napríklad šesť mesiacov, ktoré by mohli byť príliš zovšeobecnené pre naše potreby (Obr. 1).

Dáta sme spracovávali na úrovni krajov, resp. NUTS2 regiónov pre územie Slovenska. V každom kraji sme si vybrali reprezentatívnu stanicu, z ktorej sme čerpali údaje o zrážkach a evapotranspirácii. Na základe týchto dát bol vypočítaný SPEI-3 index pre jednotlivé stanice. Tieto údaje sme považovali za reprezentatívne pre celý región (Obr.1). Pri výbere staníc sme brali do úvahy kvalitu, kontinuitu a polohu stanice v regióne. Zohľadnili sme historické hľadisko, dĺžku a nepretržitosť merania na jednotlivých staniaciach. Taktiež sme vylúčili stanice, ktoré sú nefunkčné, mali nespoľahlivé dáta alebo sú nejakým iným spôsobom poškodené. Určujúcim faktorom bola aj poloha stanice, kde sme dbali na to aby bolo umiestnenie stanice v oblasti, kde má poľnohospodárstvo najdominantnejšie postavenie v rámci kraja. Po zohľadnení týchto kritérií sme v každom kraji určili reprezentatívnu stanicu (Tab. 1).



Obr. 1: Hodnoty SPEI-3 na vybraných meteorologických staniciach v jednotlivých krajoch na Slovensku od 09. 1999 až 12. 2022

Tab. 1: Vybrané meteorologické stanice

Kraj	Skratka kraja	Názov stanice
Bratislavský kraj	BA	Bratislava - letisko
Trnavský kraj	TT	Jaslovské Bohunice
Nitriansky kraj	NR	Hurbanovo
Žilinský kraj	ZA	Žilina
Trenčiansky kraj	TN	Prievidza
Banskobystrický kraj	BB	Rimavská Sobota
Prešovský kraj	PO	Jakubovany
Košický kraj	KE	Milhostov

Na analýzu vplyvu sucha na poľnohospodárstvo sme si zvolili tieto plodiny: zemiaky, kukurica, jačmeň jarný, pšenica ozimná a repka ozimná. Tieto rastliny sú zástupcami plodín, ktoré sa pestujú na území Slovenska. Údaje o úrode nám boli poskytnuté na vyžiadanie od Štatistického úradu Slovenskej republiky avšak v podobnej miere sú dostupné aj na ich webových stránkach.

Hlavnou metódou, ktorú sme použili pri písaní tejto práce bola korelácia. Je to štatistická metóda, ktorá skúma závislosť medzi dvoma premennými. Pomocou nej zisťujeme aký majú medzi sebou jednotlivé premenné vzťah a či sú na sebe závislé, to znamená, že ak sa menia hodnoty jednej premennej či sa v závislosti od toho menia hodnoty aj druhej premennej. Výsledkom korelačnej analýzy je korelačný koeficient. Korelácia môže nadobúdať hodnoty v intervale -1 až 1. Kladné hodnoty vyjadrujú priamu lineárnu závislosť, čo znamená, že ak sa jedna premenná zvyšuje, druhá sa

zvyšuje tiež. Napríklad pri vyšších hodnotách indexu SPEI môže dôjsť k zvýšeniu úrody. Naopak, záporné hodnoty znamenajú nepriamu lineárnu závislosť, kde zvýšenie jednej premennej spôsobuje zníženie druhej premennej. V prípade našej štúdie by to mohlo znamenať, že nárast vlhkosti vedie k poklesu úrody. Čím je hodnota bližšia 1, resp. (-1) tým sú premenné od seba navzájom viac závislé, pričom hodnota 0 znamená žiadnu závislosť (Tab. 2). V Tabuľke 2 sme farebne zobrazili škálu intervalov korelačného koeficientu, ktorými sme popísali a určili silu korelácie. Vyjadrenie jednotlivých korelácií slúži aj ako legenda k Tabuľkám 3 až 8 v časti Výsledky. Veľkosť korelačného koeficientu sme zobrazili v tabuľkách 3-8. Konečné hodnoty korelačného koeficientu sme testovali na štatistickú významnosť, pre ktorú sme si zvolili $\alpha = 0,05$. Štatistická významnosť je posúdenie, či je výsledok dostatočne silný na to aby sa nepovažoval za náhodný. Štatistická významnosť s $\alpha = 0,05$ znamená, že existuje 95% pravdepodobnosť, že takto označený výsledok nie je náhodný. Hviezdičkou (*) sme označili polia, ktoré sú štatisticky významné.

Tab. 2: Škála intervalov korelačného koeficientu a jeho význam

Interval korelačného koeficientu	Popis závislosti	Interval korelačného koeficientu	Popis závislosti
-0.2 - 0.0	veľmi slabá alebo žiadna	0.0 - 0.2	veľmi slabá alebo žiadna
-0.4 - -0.2	slabá	0.2 - 0.4	slabá
-0.6 - -0.4	stredne silná	0.4 - 0.6	stredne silná
- 0.8 - 0.6	silná	0.6 - 0.8	silná
-1.0 - -0.8	veľmi silná	0.8 - 1.0	veľmi silná

3. Výsledky

V tejto časti prezentujeme a analyzujeme dosiahnuté výsledky týkajúce sa vplyvu sucha na úrodu vybraných poľnohospodárskych plodín, čo má výrazný vplyv aj na ekonomiku krajiny. Pre každú analyzovanú plodinu sme vypočítali korelačný koeficient medzi výnosmi a trojmesačným štandardizovaným zrážkovo-evapotranspiračným indexom (SPEI-3). Korelácie boli počítané iba pre mesiace, v ktorých sa plodiny nachádzali vo vegetačnom období. Pričom prvá hodnota SPEI-3, s ktorou počítame zahŕňa mesiac výsevu a dva predchádzajúce mesiace, aby sa zohľadnili podmienky, ktoré vplyvajú na rast plodiny. Farebná škála v Tab. 2 slúži ako Legenda k nasledujúcim tabuľkám 3 – 8. Hviezdičkou (*) je v týchto tabuľkách vyznačené, že sa jedná o štatisticky významnú hodnotu. V Tab. 3 - 8 sú použité skratky jednotlivých krajov, ktoré sú vysvetlené v Tab. 1.

Kukurica

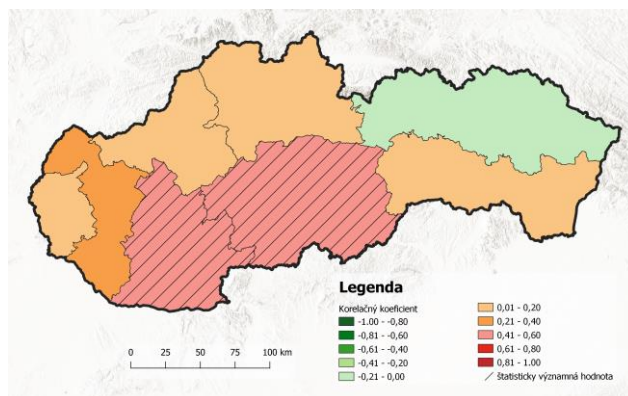
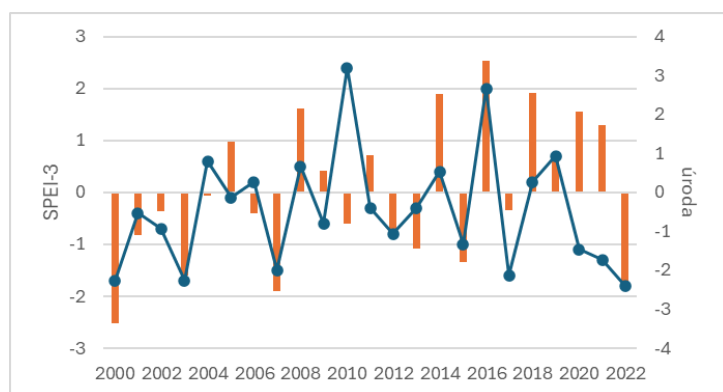
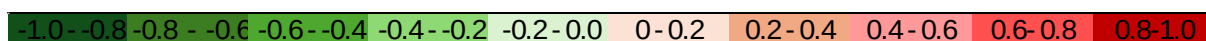
Kukurica je z celosvetového hľadiska jednou z najdôležitejších poľnohospodárskych plodín, využívanou nielen ako krmivo, ale aj v potravinárskom, škrobárenskom a energetickom priemysle (Uvírová, 2015). Na základe tabuľky 3 pozorujeme, že najvyššie korelačné hodnoty medzi SPEI-3 a úrodou kukurice boli zaznamenané počas období máj – júl a jún - august. Významné hodnoty korelácie sme zistili najmä v južných oblastiach Slovenska, pričom najvyššia korelácia bola v Nitrianskom a v Trnavskom kraji. Tieto hodnoty sú štatisticky významné, pričom v nasledujúcom období júl – september sme zaznamenali ďalšie dve významné hodnoty a to v Nitrianskom aj Banskobystrickom kraji (Obr. 2 (vpravo)). Pozorujeme, že práve v týchto regiónoch je takmer počas celého vegetačného obdobia zvýšená korelácia v porovnaní s ostatnými regiónmi. Z dát teda môžeme vyčítať, že nedostatok vlhky v mesiacoch máj, jún, júl, august najintenzívnejšie ovplyvňuje úrodu kukurice.

Na druhej strane NUTS2 regióny Žiliny a Prešova, vykazujú nízke a záporné hodnoty korelácie, čo naznačuje, že sucho v týchto oblastiach neovplyvňuje výnosy z kukurice, do takej miery ako je tomu v južných oblastiach Slovenska, prípadne ide o nepriame lineárne závislosti. Štatisticky významnú

hodnotu korelačného koeficientu, sme zaznamenali v Žilinskom kraji v čase február-apríl. V tomto štádiu sú negatívne hodnoty zaznamenané takmer na celom pozorovanom území.

Tab. 3: Korelácie SPEI-3 a úrody kukurice

obdobie	SPEI-3	BA	TT	TN	NR	ZA	BB	PO	KE
február - apríl	apríl					*			
marec - máj	máj								
apríl - jún	jún								
máj - júl	júl		*		*				
jún - august	august				*		*		
júl - september	september								



Obr. 2: Hodnoty 3-mesačného SPEI v Nitrianskom kraji za mesiac júl (čiarový graf) a štandardizovaná úroda kukurice (stĺpcový graf) (vľavo) a Korelácia medzi 3-mesačným SPEI v auguste a výnosmi kukurice (vpravo)

Zemiaky

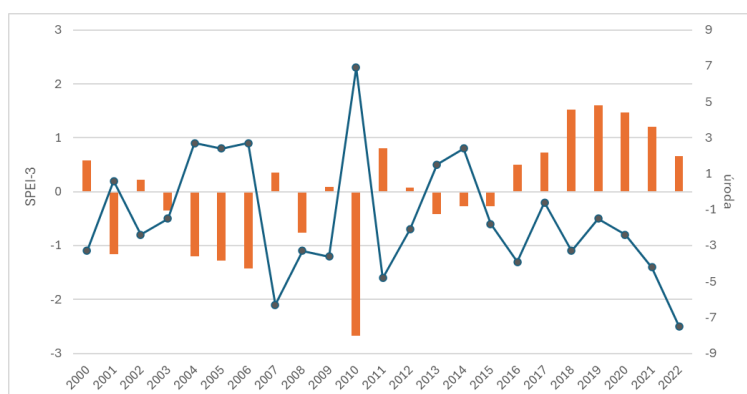
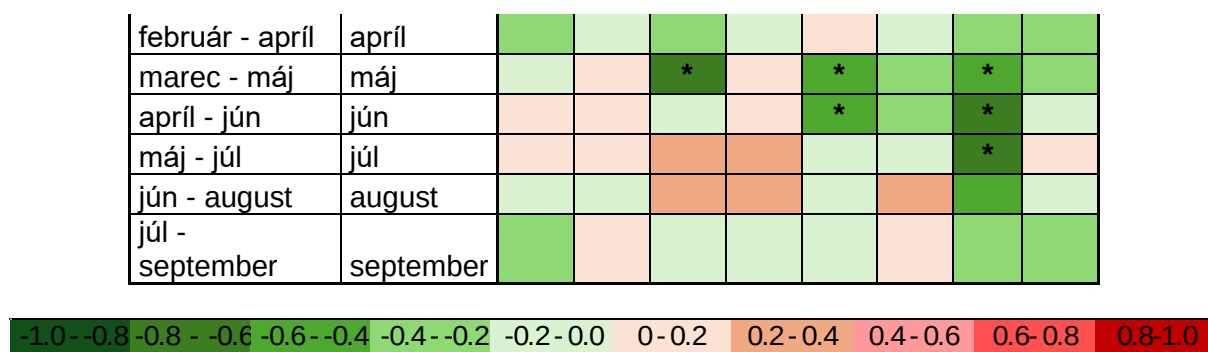
Pestovanie zemiakov reaguje odlišne na sucho, najmä v počiatočných štádiách vývoja. Nedostatok vlahy v období medzi sejbou a vzhádzaním môže mať pozitívny vplyv na tvorbu koreňového systému, čo zvyšuje schopnosť rastliny hospodáriť s vodou. Na druhej strane, sucho v neskorších fázach vegetačného obdobia môže negatívne ovplyvniť úrodu (Onofrej, 2010).

V tabuľke 4 vidíme prevažne záporné korelácie, čo vyjadruje nepriamu závislosť medzi suchom a úrodou zemiakov. Negatívna hodnota korelačného koeficientu sa častejšie vyskytujú v krajoch na severnom Slovensku, v období marec – máj najmä na v Trenčianskom, Žilinskom a Prešovskom kraji. Nízke hodnoty pretrvávajú aj v nasledujúcom období obzväšť v Žilinskom a Prešovskom kraji. Vo všetkých vyššie spomenutých krajoch boli v daných obdobiach dosiahnuté štatisticky významné hodnoty. V Prešovskom kraji počas celého obdobia zaznamenávame iba záporné hodnoty korelačného koeficientu. Naopak, korelácie s kladnými hodnotami boli v mesiacoch máj – júl a jún – august v Trenčianskom, Nitrianskom a Banskobystrickom kraji.

Z Obrázka 3 môžeme zistiť hodnoty trojmesačného indexu SPEI za mesiac jún v období rokov 2000 až 2022 a porovnať ich s výnosmi zemiakov v Prešovskom kraji. Z údajov je zrejмый trend nepriamej lineárnej závislosti – keď hodnoty sucha klesajú, výnos z úrody zemiakov sa v jednotlivých rokoch zvyšuje. Tento vzťah potvrdzuje aj korelačný koeficient -0,74, ktorý naznačuje silnú nepriamu koreláciu medzi týmito dvoma premennými.

Tab. 4: Korelácie SPEI-3 a úrody zemiakov

obdobie	SPEI-3	BA	TT	TN	NR	ZA	BB	PO	KE
---------	--------	----	----	----	----	----	----	----	----



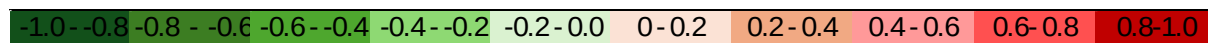
Obr. 3: Hodnoty 3-mesačného SPEI v Prešovskom kraji za mesiac jún (čiarový graf) a štandardizovaná úroda zemiakov (stĺpcový graf)

Jačmeň jarný

Táto rastlina patrí medzi rastliny s krátkym vegetačným obdobím. o nej je známe, že sa ľahšie prispôsobí suchším podmienkam ako zvýšenej vlhkosti. Toho dôkazom je aj tabuľka 5. Záporne hodnoty korelácie zaznamenávame najmä v počiatočných fázach rastu, čo naznačuje, že vyššia vlhkosť počas tohto obdobia vedie k nižšej úrode. Počas celej dĺžky pozorovaného obdobia boli na východnom Slovensku záporne hodnoty vyjadrujúce nepriamu lineárnu závislosť. Taktiež za zmienku stojí, že na Západnom Slovensku je korelačný koeficient vždy o niečo vyšší, ako na Strednom a Východnom Slovensku, z čoho vyplýva, že práve táto oblasť je náchylnejšia na nedostatok vlhky. Štatisticky významné hodnoty, s alfou menšou ako 0,05, boli zaznamenané v Žilinskom a Banskobystrickom kraji v SPEI-3 v marci a v Banskobystrickom regióne aj o mesiac neskôr. Od SPEI-3 v júny až do konca vegetačného obdobia zemiakov boli v Prešovskom kraji štatisticky významné hodnoty.

Tab. 5: Korelácie SPEI-3 a úrody jačmeňa jarného

obdobie	SPEI-3	BA	TT	TN	NR	ZA	BB	PO	KE
január - marec	marec					*	*		
február - apríl	apríl						*		
marec - máj	máj								
apríl - jún	jún							*	
máj - júl	júl							*	
jún - august	august							*	



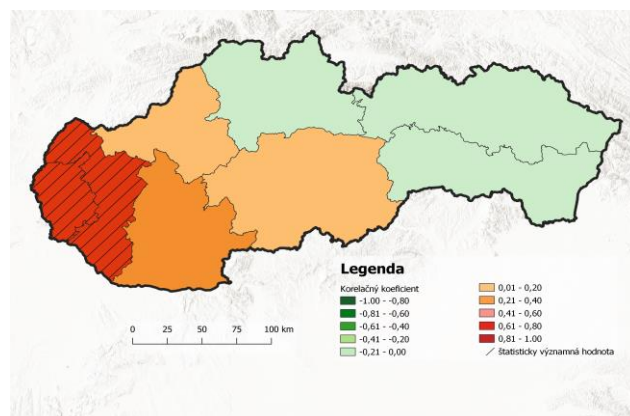
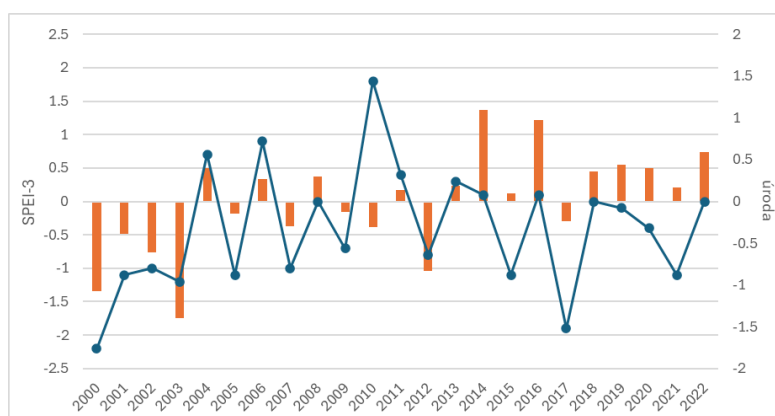
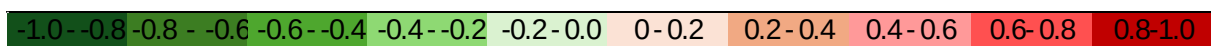
Repka ozimná

Na základe tabuľky 6 môžeme konštatovať, že sucha má na začiatku vegetačného obdobia (najmä v mesiacoch august – október a september – november) pozitívny vplyv na konečnú úrodu repky ozimnej. Táto tendencia je najvýraznejšia v Žilinskom kraji, kde bola zaznamenaná štatisticky významná korelácia.

Naopak, v záverečnej fáze vegetačného obdobia repky, od marca do júna, pozorujeme vysoké pozitívne korelácie najmä v Bratislavskom a Trnavskom kraji, kde sa tieto hodnoty ukázali ako štatisticky významné. To naznačuje, že v tomto období má sucha negatívny vplyv na výnosy repky, čo môže byť dôsledkom potreby zvýšenej vlahy pre generatívne fázy rastliny, ako je kvitnutie a tvorba semien. Štatisticky významné korelácie boli dosiahnuté v Bratislavskom kraji na konci vegetačného obdobia, no na celom Západnom Slovensku a v Banskobystrickom kraji sú vyššie hodnoty korelácie. Na ostatnom území Slovenska sú tieto hodnoty veľmi slabé a záporne. (Např. Obr. 4 (vpravo)). Aby sme si vedeli lepšie predstaviť priebeh korelácie na Obr. 4 (vľavo) sme si ukázali hodnoty SPEI-3 v júni a výnos repky v Bratislavskom kraji, s hodnotou korelačného koeficientu 0,53.

Tab. 6: Korelácie SPEI-3 a úrody repky ozimnej

obdobie	SPEI-3	BA	TT	TN	NR	ZA	BB	PO	KE
august - október	október					*			
september - november	november								
október - december	december								
november - január	január								
december - február	február								
január - marec	marec								
február - apríl	apríl								
marec - máj	máj	*	*						
apríl - jún	jún	*	*						
máj - júl	júl	*	*						



Obr. 4: Hodnoty 3-mesačného SPEI v Bratislavskom kraji za mesiac jún (čiarový graf) a štandardizovaná úroda repky ozimnej (stĺpcový graf) (vľavo) a Korelácia medzi 3-mesačným SPEI v máji a výnosmi repky (vpravo)

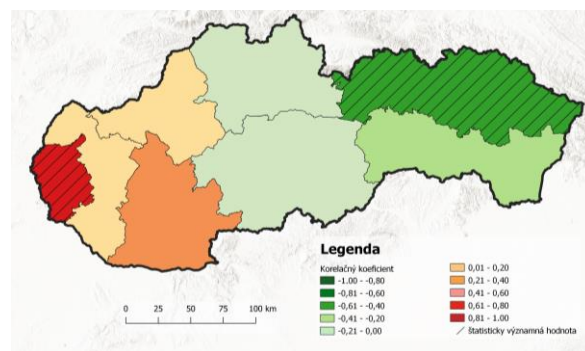
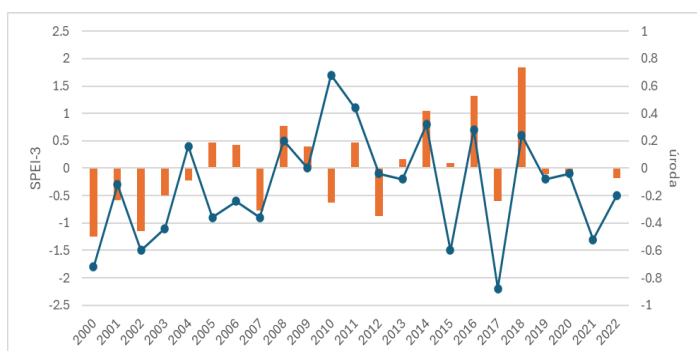
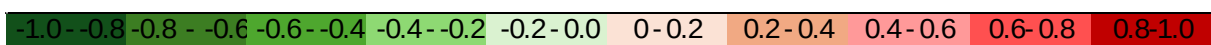
Slnčnica

Tabuľka 7 korelačného koeficientu určujúceho vzťah medzi trojmesačným SPEI a úrodou slnečnice poukazuje na výrazné regionálne rozdiely, napr. (Obr. 5 (vpravo)).

V Bratislavskom kraji sme zaznamenali dve hodnoty so stredne silnou koreláciou, ktoré ukazujú priamu lineárnu závislosť medzi nedostatkom vlhky a nepriaznivou úrodou, najmä v jarnom období. Z toho vyplýva, že sucho má v tomto regióne výrazne negatívny vplyv na výnosy slnečnice. Hodnoty SPEI-3 za mesiac júl v rokoch 2000-2022 sme si spolu so štandardizovanými výnosmi slnečnice zobrazili na grafe Obr. 5 (vľavo). V Trenčianskom kraji, v časovom intervale od marca do mája, bola zistená štatisticky významná hodnota korelácie, avšak záporná. Tento výsledok naznačuje opačný vzťah – viac vlhky v tomto období má nepriaznivý vplyv na úrodu slnečnice. V Nitrianskom, Banskobystrickom, a Trnavskom kraji pozorujeme veľmi slabé korelácie. V Prešovskom a Košickom kraji dominujú záporné korelácie, čo znamená, že vyššie množstvo vlhky môže mať negatívny vplyv na výnosy slnečnice. Táto nepriama závislosť naznačuje, že nadbytok zrážok v týchto regiónoch môže znížiť výnosy, pravdepodobne v dôsledku nepriaznivých podmienok a nadmerného vlhka.

Tab. 7: Korelácie SPEI-3 a úrody slnečnice

obdobie	SPEI-3	BA	TT	TN	NR	ZA	BB	PO	KE
február - apríl	apríl								
marec - máj	máj			*		*			
apríl - jún	jún								
máj - júl	júl	*						*	
jún - august	august							*	
júl - september	september							*	*
august - október	október								



Obr. 5: Hodnoty 3-mesačného SPEI v Bratislavskom kraji za mesiac júl (čiarový graf) a štandardizovaná úroda slnečnice (stĺpcový graf) (vľavo) a Korelácia medzi 3-mesačným SPEI v júl a výnosmi slnečnice (vpravo)

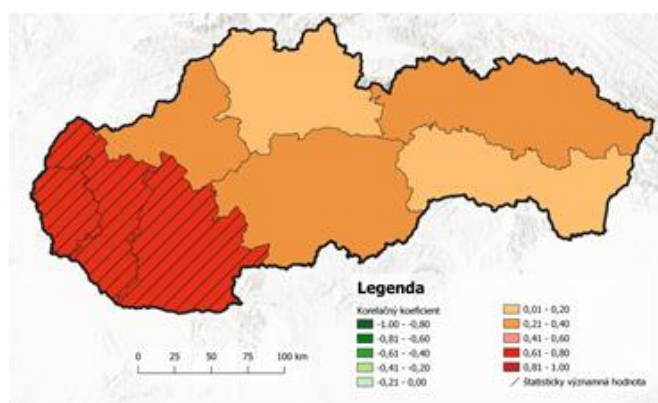
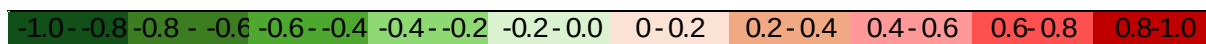
Pšenica ozimná

Je jednou z najdôležitejších plodín, ktorá zaisťuje výživu pre ľudí aj krmivo pre zvieratá. Napriek pomerne hlbokým koreňom, je veľmi citlivá na nedostatok vlhky a sucho dokáže rýchlo znížiť výnosy. Najvyššie hodnoty korelácie u pšenici ozimnej sú v ranných fázach rastu, v 3-mesačnom SPEI december a január, kde práve SPEI-3 najviac koreluje s úrodou v danom roku. (Obr. 6) Tieto počiatočné fázy sú kľúčové pre konečný výnos z tejto poľnohospodárskej plodiny.

V nasledujúcich mesiacoch, konkrétne v období december – február a január – marec, bola na celom území Slovenska korelácia blízka 0. Dokonca v Trenčianskom a Žilinskom kraji, ide o stredne silnú zápornú koreláciu. Pozorujeme tu aj regionálne odlišnosti, úroda na juhu Slovenska dosahuje väčšiu mieru závislosti od sucha v porovnaní s Východným Slovenskom (Tab. 8).

Tab. 8: Korelácie SPEI-3 a úrody pšenice ozimnej

obdobie	SPEI-3	BA	TT	TN	NR	ZA	BB	PO	KE
september - november	november								
október - december	december		*						
november - január	január	*	*		*				
december - február	február								
január - marec	marec			*		*			
február - apríl	apríl								
marec - máj	máj								
apríl - jún	jún								
máj - júl	júl								
jún - august	august								
júl - september	september							*	
august - október	október								



Obr. 6: Korelácia medzi 3-mesačným SPEI v január a výnosmi pšenice ozimnej

V tejto časti sme analyzovali vplyv sucha na úrodu vybraných poľnohospodárskych plodín a odhalili významné regionálne a časové rozdiely v citlivosti plodín na nedostatok vlhky. Najvýraznejší vplyv sucha bol zaznamenaný v južných oblastiach Slovenska, čo potvrdzuje Ivaňáková et al. (2016) Zatiaľ čo, v niektorých severnejších regiónoch, ako je Žilinský či Prešovský kraj, bola závislosť medzi suchom a úrodou plodín menej výrazná alebo negatívna.

Celkovo výsledky naznačujú, že citlivosť na sucho je variabilná v závislosti od regiónu a fáz rastu samotnej plodín, čo podčiarkuje potrebu regionálne špecifických adaptačných stratégií na zvládanie sucha v poľnohospodárstve. Väčšie hodnoty korelácie sú zaznamenané na západnom a južnom Slovensku. To pre Slovensko a Slovensku ekonomiku môže predstavovať škody, keďže najúrodnejšia pôda je práve v týchto oblastiach.

4. Diskusia

Každá analyzovaná plodina reagovala na sucho inak pričom pozorujeme výrazné rozdiely medzi jednotlivými regiónmi. Sucho je jeden z rozhodujúcich faktorov ovplyvňujúcich poľnohospodársku produkciu, no výsledná úroda je komplexným súhrnom viacerých faktorov, ktoré počas daného roku vplývajú na rastlinu a prostredie (Yang et al. 2021). Jednotlivým rastlinám vyhovujú rôzne prírodné

podmienky. Medzi tieto faktory patria nielen klimatické podmienky, ale aj kvalita pôdy, prítomnosť zrážkového tieňa, množstvo slnečného svitu a lokálna mikroklima. Tieto environmentálne podmienky spoločne ovplyvňujú schopnosť plodín prispôbiť sa a odolávať suchým obdobiam, čím výrazne prispievajú k rozdielom v produkcii medzi rôznymi regiónmi.

Z našich výsledkov vyplýva, že v mnohých prípadoch má sucho priamy vplyv na úrodu v danom roku. Ak budú klimatické podmienky pokračovať v súčasnom trende, slovenskí poľnohospodári budú musieť prispôbiť pestovanie plodín novým klimatickým podmienkam, prípadne bude potrebné prejsť na pestovanie suchu odolnejších plodín, či vyšľachtiť také odrody alebo zaviesť moderné technológie, zavlažovacie systémy a využiť ďalšie inovatívne metódy. Inšpiráciu na riešenie problémov so suchom v poľnohospodárstve môžeme nájsť v iných krajinách, ktoré taktiež čelia zmene klimatických podmienok, podobne ako Slovensko.

Jedným z hlavných obmedzení tejto štúdie je fakt, že sme čerpali údaje len z jednej meteorologickej stanice pre každý región. To nezohľadňuje lokálne mikroklimatické rozdiely, ktoré môžu výrazne ovplyvniť výsledky. Bolo by vhodné rozdeliť územie na menšie zóny a presnejšie skúmať vplyv sucha na jednotlivé plodiny, podobne ako Labudová (2017) pre územie Poddunajskej a Východoslovenskej nížiny.

Na účely tohto príspevku sme si zvolili SPEI index, pri ďalšom skúmaní problematiky by bolo vhodné porovnať hodnoty aj s inými indexami SPI, CMS, ESI ale taktiež porovnať aj korelácie s SPEI-2 a iné a analyzovať, v čom sa zhodujú a naopak, v čom sa líšia aby sa získali, komplexné dáta a zistilo sa ako najviac minimalizovať škody spôsobené suchom (Labudová et al., 2017; Jurečka 2016).

Budúci výskum by sa mohol rozšíriť aj o ďalšie poľnohospodárske plodiny a zistiť ich citlivosť na sucho v rôznych častiach Slovenska. Zároveň by bolo prínosné skúmať inovačné technológie, ktoré by pomohli minimalizovať negatívne dôsledky klimatickej zmeny a zabezpečili stabilitu poľnohospodárskej produkcie.

5. Záver

Táto štúdia poskytla hlbší pohľad na vplyv meteorologického sucha na úrodu vybraných poľnohospodárskych plodín v NUTS2 regiónoch Slovenska v období 2000–2022. Výsledky ukázali, že sucho výrazne ovplyvňuje produkciu, pričom v južných regiónoch Slovenska boli zaznamenané najvýznamnejšie negatívne dopady. Každá analyzovaná plodina reagovala na sucho inak, čo zdôrazňuje potrebu diferencovaných prístupov pri prispôbovaní poľnohospodárskych postupov meniacim sa klimatickým podmienkam.

Získané výsledky naznačujú, že v budúcnosti bude pre slovenské poľnohospodárstvo kľúčové adaptovať sa na rastúce riziká spojené so suchom. Možnosti zahŕňajú prechod na suchu odolnejšie odrody, zavedenie moderných technológií na zefektívnenie poľnohospodárskej produkcie, manažment vody, ako sú zavlažovacie systémy. Inšpiráciu pre tieto kroky je možné čerpať aj z iných krajín, ktoré čelia podobným klimatickým ohrozeniam.

Jedným z obmedzení tejto práce bol výber len jednej meteorologickej stanice pre každý región, čo mohlo ovplyvniť presnosť výsledkov. V budúcnosti by bolo vhodné rozšíriť štúdiu na viacero meteorologických staníc v rámci regiónov a zahrnúť ďalšie poľnohospodárske plodiny. Taktiež by bolo prínosné porovnať rôzne indexy, ako je SPI alebo CMS aby sa získali komplexnejšie údaje o vplyve sucha na plodiny.

Pochopenie vplyvu sucha na poľnohospodársku produkciu má zásadný význam pre rozvoj adaptačných stratégií, ktoré môžu pomôcť zmierniť negatívne dôsledky klimatickej zmeny a zaistiť dlhodobú udržateľnosť poľnohospodárstva na Slovensku.

Zoznam literatúry

ČESKÉ METEOROLOGICKÉ SPOLEČNOSTI. 1993: Elektronický meteorologický slovník (eMS). [online]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>

JUREČKA, F., ANDERSON, M. C., HLAVINKA, P., HAIN C. R., DULANEY, W., GAO, F., JOHNSON, D. M., OTKIN, J., ZALUD, Z., TRNKA, M. 2016: Mapování sucha a odhad výnosů

polných plodín pomocí indexu ESI. In VÚMOP, ROŽNOVSKÝ, J., VOPRAVIL, J. eds. *Pôdňí a zemědělské sucho*. (Nakladatelství Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy), pp. 130-139. Dostupné na:

https://www.researchgate.net/publication/305633888_Comparison_of_SPI_and_SPEI_applicability_for_drought_impact_assessment_on_crop_production_in_the_Danubian_Lowland_and_the_East_Slovakian_Lowland

IVAŇÁKOVÁ, G., FAŠKO P., LABUDOVÁ, L. 2016: Zmeny vybraných charakteristík meteorologických prvkov v nížinných polohách Slovenska a ich vplyv na klasifikáciu klímy. *Meteorologický časopis*, 19(1), pp. 23-34. Dostupné na:

https://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/MET_CASOPIS/2016-1_MC.pdf

LABUDOVÁ, L., IVAŇÁKOVÁ, G., FAŠKO P., KAJABA, P., LABUDA, M. 2024: Changes in drought occurrence and intensity in the context of climate change in Slovakia. *Theor Appl Climatol*, 155, 4009–4022. Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04864-3>

LABUDOVÁ, L., LABUDA, M., TAKÁČ, J. 2017: Comparison of SPI and SPEI applicability for drought impact assessment on crop production in the Danubian Lowland and the East Slovakian Lowland. *Theoretical and Applied Climatology*, 128(1-2), 491–506. Dostupné na:

MISHRA, A. K., SINGH, V. P. 2010: A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), pp 202–216. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169410004257>

UVÍROVÁ, V. 2015: Výživa a hnojenie kukurice siatej (I.). *Rolnícke noviny*. Dostupné na: <https://rno.sk/vyziva-a-hnojenie-kukurice-siatej-i/>

ONOFREJ, P. 2010: Biologicko - pestovateľská analýza pestovania zemiakov. Nitra. Dostupné na:

<http://crzp.uniag.sk/Prace/2011/O/8011E3D7ED1F43D9B51170AD2E2C5141.pdf>

VICENTE-SERRANO, M. S., BEGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, I. J. 2010: A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), pp. 1696–1718. Dostupné na: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/23/7/2009jcli2909.1.xml>

WILHITE, D.A. ed. 2005: *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues* (Boca Raton) CRC Press [online]. Dostupné na: <https://doi.org/10.1201/9781420028386>

YANG, X.; LU, M.; WANG, Y.; WANG, Y.; LIU, Z.; CHEN, S. 2021: Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulturae*, 7(3), pp. 50 - 86. Dostupné na: <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>

Satelitné merania slnečného žiarenia a ich využitie pri hodnotení účinnosti fotovoltických elektrární

Peter Kaňák

Anotácia

Štúdia mapuje intenzitu slnečného žiarenia na Slovensku pomocou satelitných údajov od roku 2012 až do súčasnosti, pričom identifikuje regionálne rozdiely v iradiancii a popisuje ich príčiny. V štúdií bola tiež preukázaná možnosť využitia satelitných dát pri správe a plánovaní fotovoltických elektrární na území Slovenska.

Annotation

The study maps intensity of solar irradiance in Slovakia using satellite measurements from 2012 to the present, identifying regional differences of irradiance and describing their causes. The study also demonstrates the feasibility of using satellite data in the management and planning of photovoltaic power plants in Slovakia.

Abstract

The primary objective of this study was to map the intensity of solar radiation reaching the territory of Slovakia by utilizing satellite data spanning the period from 2012 to 2023. By processing and analyzing data obtained from the Meteosat Second Generation (MSG) satellites, we developed comprehensive maps depicting long-term average solar insolation for individual days and months. This mapping effort has enabled us to identify and illustrate local differences in solar radiation distribution across various regions of Slovakia. The data on solar radiation are processed regularly on monthly basis by the Slovak Hydrometeorological Institute (SHMÚ), ensuring that this critical information is readily available to SHMÚ employees for further analysis and practical application.

Our findings revealed that the maximum levels of insolation are predominantly observed in southwestern Slovakia, particularly in the Podunajská nížina region, while the minimum insolation values are recorded in the mountainous Tatra region. A comparative analysis between satellite data and measurements gathered from ground-based pyranometers confirmed the high accuracy of the satellite-based assessments, with deviations remaining within a 10% range. Notably, the discrepancies between satellite-based and pyranometer-based measurements were most pronounced in mountainous regions during winter months, attributed to the presence of snow cover, which can occasionally be misinterpreted by satellites as dense cloud cover. Conversely, the smallest discrepancies were noted in the lowland areas of Slovakia, where satellite data closely aligned with ground measurements.

In addition to mapping solar radiation, we conducted a detailed analysis of the efficiency of a photovoltaic (PV) power plant located in the southern part of Slovakia. Over the years 2020 and 2021, the plant achieved an average efficiency of 14.7%. Intriguingly, we found that the plant's efficiency in converting solar energy into electricity was notably higher during the winter months, approximately reaching 17%. This phenomenon can be attributed to the more favourable angle of sunlight incidence, particularly during early morning hours when the sun rises in the northeast and during the evening when it sets in the northwest. Such seasonal variations significantly impact the output of the PV panels, which are oriented towards the south.

Moreover, our study explored the influence of voltage fluctuations within the power grid on the operational performance of the photovoltaic power plant. We examined how transient cloud cover passing over the facility affected its electricity output. By utilizing satellite imagery, we were able to differentiate between reductions in output caused by cumulative cloud cover and those triggered by exceeding the upper voltage threshold of 253 V - a technical norm that necessitates the automatic shutdown of the PV plant if the voltage surpasses this limit.

This research offers valuable insights into the distribution of solar energy throughout Slovakia, providing essential information for the planning and development of future solar power projects in the region. The study emphasizes not only the spatial and temporal variability of solar radiation but also the critical importance of accurate satellite data in assessing local solar potential. With the ongoing processing and accessibility of solar radiation data at SHMU, continuous monitoring and analysis of solar conditions become feasible, thereby supporting future energy strategies.

Furthermore, the comprehensive analysis of the photovoltaic plant's performance yields practical findings that can aid in optimizing energy output, particularly under varying atmospheric conditions. This thorough evaluation of solar radiation patterns and photovoltaic efficiency enhances our understanding of renewable energy production in Slovakia, establishing a solid foundation for future studies and initiatives.

Ultimately, the results of this study are crucial for energy policymakers and investors, as they provide substantial support for efforts aimed at increasing the share of solar energy within Slovakia's energy mix. This is especially pertinent as the country progresses toward greater sustainability and a stronger reliance on renewable energy sources. By addressing the intricate dynamics of solar radiation and photovoltaic efficiency, this research contributes to a more informed approach to energy resource management in Slovakia.

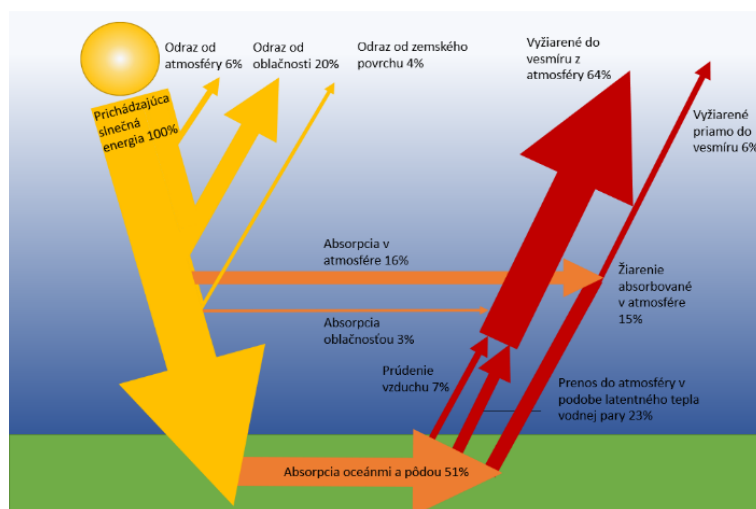
1 Úvod

Solárna energia je vo svojej podstate hnacím strojom všetkých prírodných dejov, z ktorých by sme mohli čerpať obnoviteľné zdroje energie. Pohyb vzduchových hmôt využívaný pri veternej energetike, je spôsobený rôznymi teplotnými a tlakovými gradientmi, a tie sú následkom nerovnomerného ohrievania zemského povrchu slnečnou energiou. Potenciálna energia vodných mäs, ktorá pri zmene na kinetickú energiu roztáča turbíny vo vodných elektrárnach je dôsledkom kolobehu vody v prírode, ktorého hnacou silou je opäť solárna energia.

Merania slnečného žiarenia tak pre nás môžu byť veľmi užitočným nástrojom pri plánovaní budúcich zariadení na konverziu všetkých spomenutých druhov energií na energiu elektrickú, ako aj pri odhadovaní účinnosti týchto zariadení. Prvým spôsobom na určovanie slnečného žiarenia v danej lokalite je použitie meteorologických prístrojov ako napríklad heliograf či pyranometer [Tkáč Ján, Hvizdoš Marek]. Tieto prístroje merajú dĺžku slnečného svitu, respektíve jeho intenzitu s veľkou presnosťou, avšak len na konkrétnej lokalite. V prípade, že sú potrebné údaje o väčšej časti územia, je vhodné použiť satelitné merania. Tie majú v súčasnosti schopnosť merať okrem mnohých iných fyzikálnych veličín aj intenzitu slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch kdekoľvek na Zemi.

Kolmo na hornú hranicu atmosféry našej planéty dopadá žiarenie s výkonom 1363 W/m^2 [Dewitte Steven, et al.]. Táto hodnota sa nazýva solárna konštanta a bola určená pomocou satelitných meraní pre strednú vzdialenosť Zeme od Slnka. Žiarenie dopadajúce na zemský povrch je však omnoho menšie. 6% zo slnečného žiarenia je odrazených späť do vesmíru od atmosféry, 20% je odrazených od oblačnosti a štyri percentá od zemského povrchu. Šesťnásť percent celkového dopadajúceho žiarenia je absorbovaných atmosférou, ďalšie 3% oblačnosťou a 51% je absorbovaných oceánmi a zemským

povrchom [Caprion D., et al.]. Zemské albedo, teda miera odrazivosti slnečného žiarenia od našej planéty je zaokrúhlene 30 percent (obrázok 1).



Obrázok 1: Radiačná bilancia Zeme, zdroj [Caprion D., et al.]

Konkrétna hodnota dopadajúceho slnečného žiarenia na zemský povrch závisí od mnohých faktorov. Najpredvídateľnejšiu časť zmien v insolácii tvoria faktory súvisiace s obehom Zeme okolo Slnka. Obežná dráha Zeme okolo Slnka je excentrická elipsa, čo spôsobuje, že najbližšie k Slnku sa nachádzame na začiatku januára a najďalej od našej hviezdy sa nachádzame na začiatku júla.

Okrem vzdialenosti od Slnka je dopadajúce žiarenie na zemský povrch ovplyvnené aj 11 ročným slnečným cyklom, závisiacim od slnečnej aktivity, náklonom rotačnej osi Zeme, a taktiež súradnicami danej lokality na Zemi, najmä zemepisnou šírkou, nadmorskou výškou, ale aj zakalením atmosféry a rôznymi inými vplyvmi, predovšetkým oblačnosťou.

1.1 Meranie slnečného žiarenia

Slnečné žiarenie dopadajúce na zemský povrch je významným faktorom ovplyvňujúcim počasie a aj klímu, teda dlhodobý vývoj počasia a rovnako významným faktorom je slnečné žiarenie aj ako zdroj obnoviteľnej energie. Vo všeobecnosti sú známe tri spôsoby, ktorými vieme určiť toto žiarenie: pozemné merania (pyranometre), numerické modelovanie a satelitné merania. Každý z týchto spôsobov má svoje výhody i nedostatky [Huang Guanghui, et al.].

Pozemné meteorologické merania sú najspoľahlivejšou a najjednoduchšou cestou ako získať informácie o trvaní a intenzite slnečného žiarenia. Ich nedostatkom však je, že udávajú len hodnoty špecifické pre miesto merania, a teda sú nevhodné na popis slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch na väčších územiach, alebo na vzdialených miestach s nedostatkom meracích staníc, ako napríklad oceány [Huang Guanghui, et al.].

Numerické modely všeobecnej cirkulácie, na rozdiel od pozemných meraní, dokážu reprodukovať priebeh slnečného žiarenia v priestore aj v čase na regionálnej, ale i globálnej úrovni. Ich najväčšou devízou je kompletnosť a konzistentnosť údajov, čo je obzvlášť významné pre klimatologické účely. Slabšou stránkou numerických modelov je simulácia a predpoveď výskytu oblačnosti [Huang Guanghui, et al.].

Schopnosť určovania priestorového rozloženia oblačnosti a jeho dynamického vývoja je hlavnou prednosťou satelitných meraní pri určovaní dopadajúceho slnečného žiarenia. Práve tejto schopnosti vďaka satelitné merania za fakt, že sú podľa niektorých štúdií považované za spoľahlivejšiu možnosť

určovania slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch ako numerické modely. Na základe štúdií z minulej dekády vieme povedať, že neistoty satelitných meraní sú už v súčasnosti na úrovni neistôt pozemných meraní [Huang Guanghui, et al.].

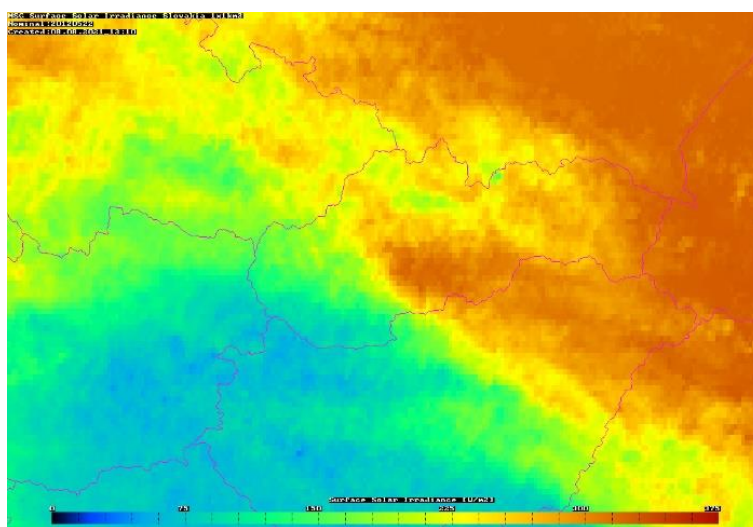
Pri meraniach slnečného žiarenia na povrch Zeme sú najdôležitejšími prvkami v atmosfére tieto tri komponenty: ozón, vodná para a aerosóly. To však platí len za predpokladu, že je bezoblačná obloha. Ozón a vodná para absorbujú slnečné žiarenie rôznych vlnových dĺžok, čo znamená, že ich výskyt môže byť presne určený na základe ostrých hraníc medzi ich absorpčnými spektrami. Preto je na odhad slnečného žiarenia používaný zväčša produkt tých kanálov, ktoré monitorujú práve tieto súčasti atmosféry [Huang Guanghui, et al.]. Vo všeobecnosti väčšina algoritmov používaných pri výpočte insolácie nadhodnocuje slnečné žiarenie nad oblasťami bez snehovej pokrývky, a naopak podhodnocuje slnečné žiarenie nad regiónmi pokrytými snehom. To je zapríčinené podobnými optickými vlastnosťami oblačnosti a snehovou pokrývkou. Zatiaľ čo rozlíšenie snehu a oblačnosti je technicky možné, presné určenie výšky oblačnosti je v tomto prípade už omnoho náročnejšie [Huang Guanghui, et al.].

Najväčšou devízou, ale zároveň aj výzvou pre satelitné merania slnečného žiarenia je oblačnosť. Jedným problémom spôsobeným oblačnosťou je jej priestorová variabilita, ktorá sa pohybuje v stovkách metrov až desiatkach metrov, zatiaľ čo rozlíšenie snímky je v kilometroch. Druhým problémom je zloženie oblakov. Zmiešaná oblačnosť, teda taká oblačnosť, v ktorej sa nachádzajú aj ľadové kryštáliky aj vodné kvapky, nie je v prírode výnimkou. Ľad a voda majú rôzne optické vlastnosti, a preto slabá schopnosť rozlíšiteľnosti týchto dvoch komponentov oblačnosti zapríčiňuje chyby pri odhade žiarenia dopadajúceho na Zem [Huang Guanghui, et al.].

2 Vyhodnotenie dlhodobých priemerov insolácie územia Slovenska

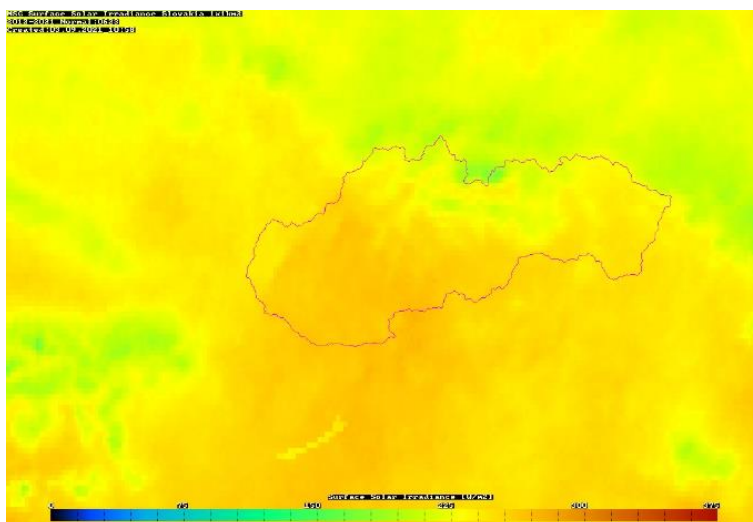
Hlavným cieľom našej práce bolo zmapovanie intenzity slnečného žiarenia dopadajúceho na územie Slovenska na základe satelitných údajov. To sme docielili spracovaním satelitných dát za obdobie rokov 2012 až 2023 (12 rokov) pomocou softvérového vybavenia určeného na prácu so satelitnými produktmi série družíc MSG, ktoré bolo vytvárané na SHMÚ už od roku 2002 a zároveň s pomocou nových programov v programovacom jazyku C, ktoré boli špeciálne vytvorené v priebehu našej práce.

Potom ako sme spracovali údaje pre jednotlivé dni, začali sme s vytváraním máp zobrazujúcich dlhodobé priemery insolácie územia Slovenska.



Obrázok 3: SSI 22.5.2012

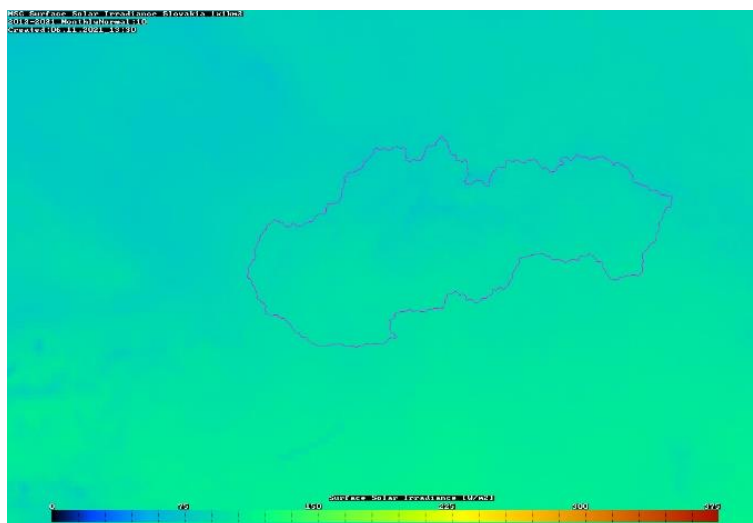
Na obrázku 3 vidíme názornú ukážku spracovaného satelitného produktu SSI (Solar Surface Irradiance) pre 22. máj 2012. Stupnica pre túto mapu je v rozpätí od 0 W/m² (tmavomodrá až čierna) po 375 W/m² (tmavočervená). Na mape je znázornený priemerný slnečný výkon, ktorý počas daného dňa dopadal na zemský povrch. Pozorujeme, že jednotlivé oblasti s vysokou a nízkou hodnotou slnečného príkonu sú výrazne ohraňované v závislosti od rozloženia oblačnosti v daný deň. Takéto mapy majú svoje využitie, avšak pre hodnotenie z dlhodobého hľadiska za účelom určenia vhodnosti danej lokality pre výrobu energie zo slnečných lúčov je ich výpovedná hodnota veľmi malá.



Obrázok 4: 10-ročný priemer pre 23. jún

Na obrázku 4 je zobrazený príklad 10-ročného denného priemeru. Stupnica je rovnaká ako v predchádzajúcom prípade 0 – 375 W/m². Z tohto obrázka už začíname mať predstavu o dlhodobom rozložení solárnej energie v rámci Slovenska, keďže vznikol spriemerovaním 23. júna počas desiatich rokov. Na obrázku vidíme, že maximum slnečnej energie dopadá na juhozápadnú časť Slovenska a minimum v severných hornatých oblastiach.

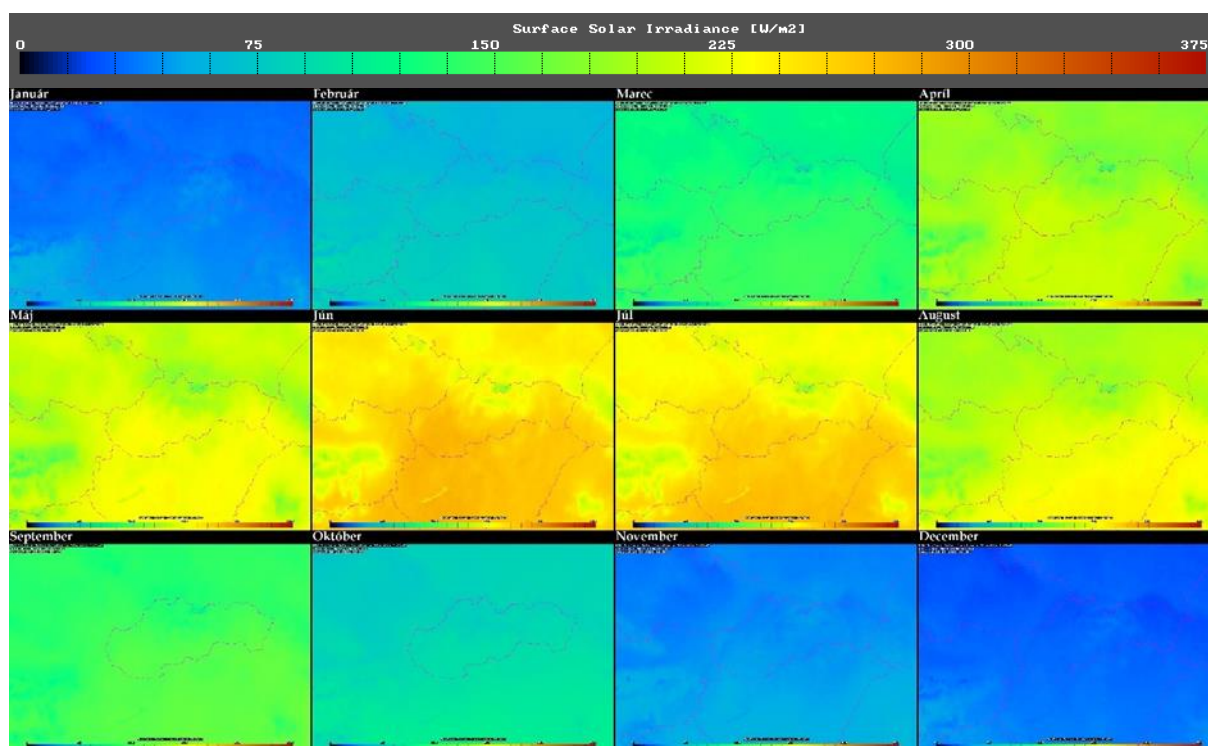
Naším ďalším krokom bolo zostrojenie máp zobrazujúcich priemernú intenzitu slnečného žiarenia za celé mesiace. Takéto obrázky už majú vysokú výpovednú hodnotu z dlhodobého hľadiska, keďže vznikli na základe dát z cca 300 dní (30 dní na mesiac krát 10 rokov). Príkladom takejto mapy je obrázok 5.



Obrázok 5: 10-ročný priemer pre október

Vidíme, že na tomto obrázku sú veľmi jemné prechody medzi jednotlivými oblasťami. Rozdiel medzi najosvetlenejšou časťou nášho územia, Podunajskou nížinou, a najmenej osvetlenými Vysokými Tatrami je približne 30 W/m^2 . To je výrazne menej ako rozdiel približne 100 W/m^2 , ktorý sme mohli pozorovať na obrázku 4. Je to spôsobené hneď niekoľkými faktormi. Na obrázku 5 je spracované dlhšie obdobie, a preto aj rozdiely v rámci nášho územia sú menšie. Druhým faktorom je celkovo nižšia intenzita slnečného žiarenia na obrázku 5, kde je zobrazený október a v porovnaní s obrázkom 4 kde je zobrazený 23. jún, čo spôsobuje, že absolútny rozdiel medzi danými lokalitami je menší ako v prípade letných mesiacov kedy je intenzita slnečnej energie vyššia. Tretím faktorom spôsobujúcim jednoliaty vzhľad snímky môžu byť jesenné hmly. Vieme, že hmly sa vyskytujú prevažne v rovinatých oblastiach, alebo údoliach. A práve to sú územia s vyššou insoláciou, čo spôsobuje potláčanie rozdielu medzi hornatými a nížinnými oblasťami.

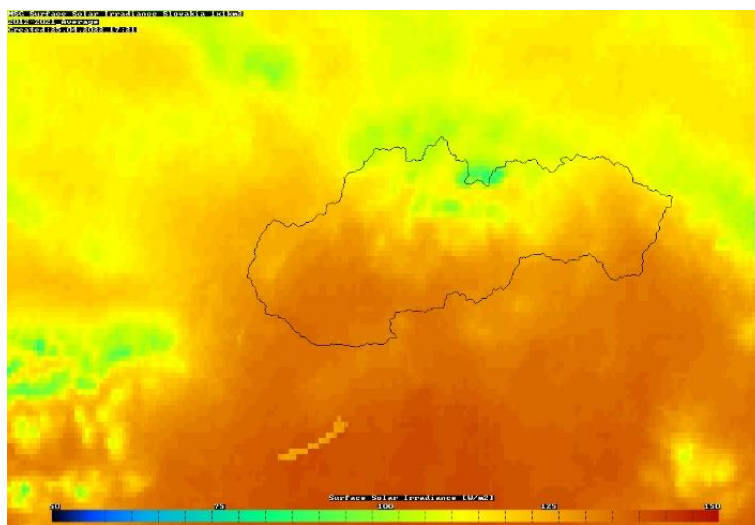
Obrázok 6 zobrazuje všetkých 12 desaťročných mesačných priemerov za roky 2012 až 2021. Stupnica je rovnaká ako pri všetkých predchádzajúcich obrázkoch $0 - 375 \text{ W/m}^2$. Mesiace sú zoradené od januára v ľavom hornom rohu až po december v pravom dolnom rohu. Na tomto obrázku je pekne ilustrovaný ročný chod intenzity slnečného žiarenia. Minimum pozorujeme v decembri, kedy sa pohybujeme v okolí 50 W/m^2 .



Obrázok 6: 10-ročné mesačné priemery

Rozdiely v rámci územia Slovenska sú takmer zanedbateľné. Maximum je dosahované v júni na juhozápadnom Slovensku, kde sa priemerná slnečná intenzita pre tento mesiac pohybuje nad úrovňou 300 W/m^2 . Na rozdiel od zimných mesiacov, v júni pozorujeme výrazné regionálne rozdiely na našom území. Na mape vidíme ľahko rozpoznateľné minimum v oblasti Tatier, ktoré nadobúda hodnotu cca 170 W/m^2 . Toto výrazné minimum je zapríčinené konvektívnou oblačnosťou tvoriacou sa pravidelne nad hornatým územím počas letných mesiacov, hlavne v poobedňajších hodinách, čo súvisí s letným chodom vývoja oblačnosti.

Posledným obrázkom popisujúcim dlhodobý priemer intenzity slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch je obrázok 7. Na tomto obrázku je celkový 10-ročný priemer za roky 2012 až 2021.

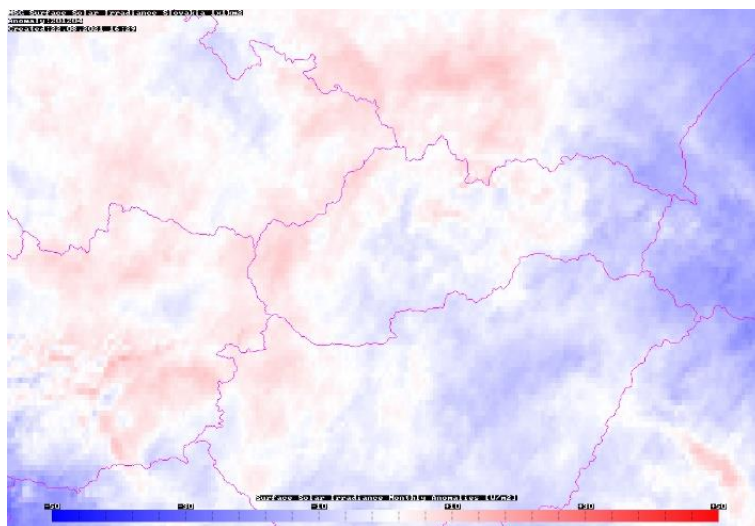


Obrázok 7: Priemer 2012-2021

V tomto prípade je stupnica v rozmedzí 50 – 150 W/m². Vidíme, že obrázok pripomína obrázky znázorňujúce letné priemery. To je logické pri uvedení si faktu, že intenzita slnečného žiarenia je v lete výrazne vyššia ako v zime, a takisto faktu, že variácie v rámci územia Slovenska sú počas zimných mesiacov zanedbateľné. Maximum je opäť dosahované na juhozápade našej krajiny (130 W/m²) a minimum je v oblasti Tatier (80 W/m²), čo predstavuje len 60% zo slnečného príkonu dopadajúceho na Podunajskú nížinu. To znamená, že v prípade umiestnenia rovnakého fotovoltického panela napríklad v Tatranskej Lomnici, by tento vyrobil len 60% z toho, čo rovnaký panel na Podunajskej nížine.

Po vypočítaní dlhodobých priemerov sme pristúpili k určovaniu mesačných anomálií v intenzite dopadajúcej slnečnej energie. Obrázky znázorňujúce mesačné anomálie hovoria o tom, aké množstvo slnečnej energie dopadlo na územie Slovenska za daný mesiac v porovnaní s 10-ročným priemerom pre skúmaný mesiac.

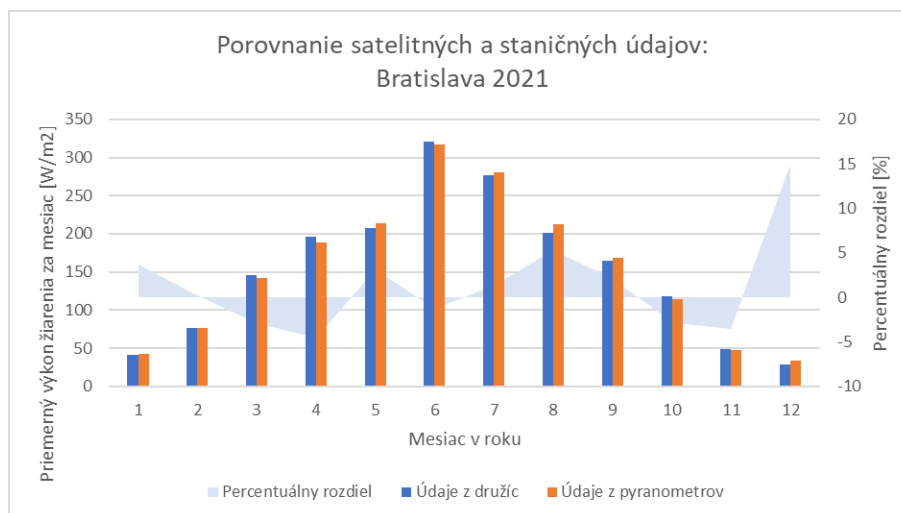
Na obrázku 8 je mesačná anomália pre apríl 2012. Stupnica sa v tomto prípade pohybuje v rozpätí -50 W/m² až +50 W/m². Z obrázka vidíme, že apríl 2012 bol podobný nami určenému 10-ročnému normálu. Biele oblasti predstavujú miesta s rovnakou intenzitou slnečného žiarenia ako udáva dlhodobý priemer, teda anomália je 0 W/m². Na severozápade Slovenska pozorujeme jemne červené sfarbenie naznačujúce mierny nadbytok slnečnej energie oproti 10-ročnému priemeru, približne +20 W/m². Modré oblasti na grafe predstavujú miesta s menšou intenzitou slnečného žiarenia, pričom najvýraznejšia odchýlka bola na východe nášho územia, približne -20 W/m².



Obrázok 8: Mesačná anomália pre apríl 2012

3 Porovnanie s pyranometrami

Po vyhodnotení dlhodobých priemerov sme pristúpili k porovnaniu satelitných dát s pyranometrickými dátami. Dáta z pyranometrov sme získali z MySQL databázy SHMÚ pre obdobie rokov 2020 a 2021. Pracovali sme s údajmi z automatických meteorologických staníc, pričom našou snahou bolo, aby náš výber staníc reprezentoval čo najlepšie celé územie Slovenska. Na základe týchto kritérií sme spracovali dáta z pyranometrov v Bratislave, Hurbanove, v Lieseku (Orava), v Gánovciach (pri Poprade) a v Košiciach.



Obrázok 9: Porovnanie satelitných a pyranometrických mesačných priemerov insolácie

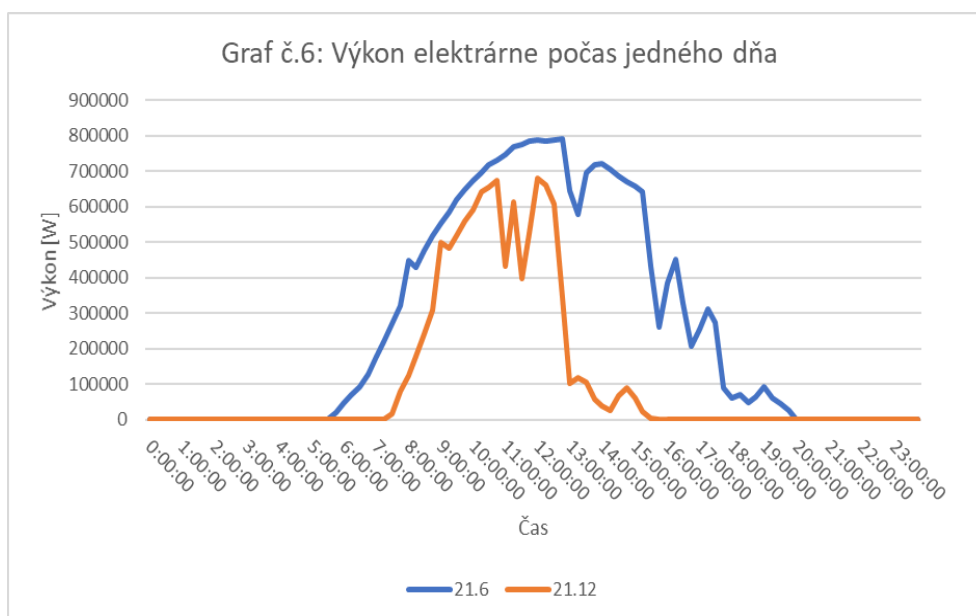
Na obrázku 9 je príklad takéhoto porovnania pre stanicu Bratislava letisko pre rok 2021. Stĺpčeky v grafe predstavujú priemerné intenzity slnečného žiarenia pre dané mesiace určené na základe satelitných meraní (modré), respektíve pyranometrov (oranžové). Plošný graf zobrazuje percentuálny rozdiel medzi údajmi z jednotlivých zdrojov. Vidíme, že hodnoty z oboch zdrojov sú takmer identické po celý rok, pričom percentuálny rozdiel sa pohybuje v rozmedzí -5% až +5%. Výnimkou je december, kedy je tento rozdiel až 15%, čo je spôsobené menšou celkovou intenzitou slnečného žiarenia, a teda väčšou relatívnou chybou, a zároveň aj skutočnosťou, že v zimných

mesiacoch majú satelitné dáta tendenciu podhodnocovať hodnoty slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch, pretože v niektorých prípadoch dochádza k zámene snehovej pokrývky a oblačnosti.

Vo všeobecnosti boli rozdiely medzi satelitnými a pyranometrickými dátami na úrovni pod 10%. Vyššie odchýlky sme získali pre stanice umiestnené v hornatejších lokalitách (Liesek, Gánovce), čo má za následok fakt, že produkt SSI nezapočítava do svojich údajov orografické nerovnosti. Ako veľmi spoľahlivé sa satelitné merania ukázali pre nížinaté oblasti, keďže ako vidíme na obrázku 9, odchýlky medzi satelitnými a pyranometrickými údajmi tu boli minimálne.

4 Účinnosť fotovoltickej elektrárne

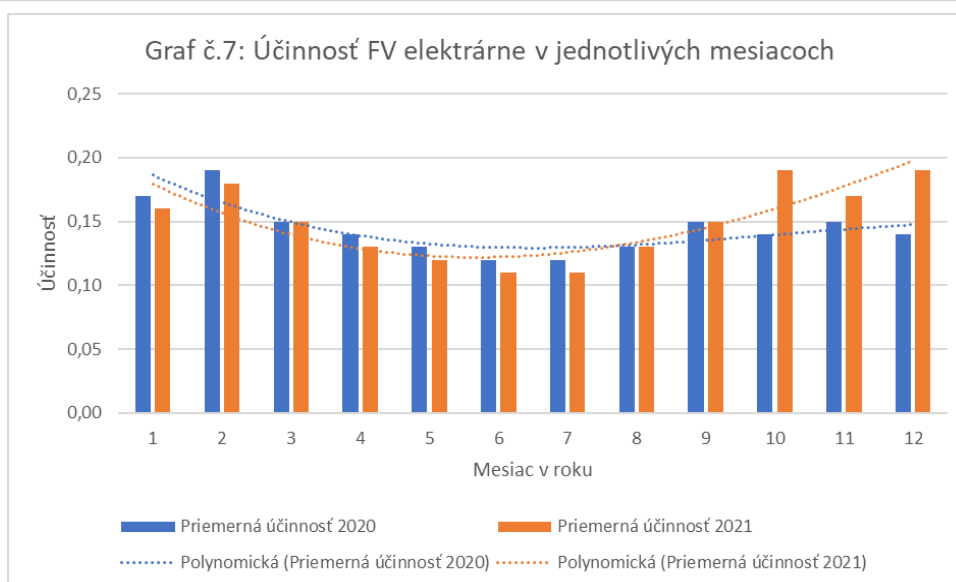
Na porovnanie satelitných údajov a údajov z fotovoltickej elektrárne sme zvolili elektráreň umiestnenú na juhu stredného Slovenska pri obci Babinec v nadmorskej výške 415 m n. m. Z tejto elektrárne sme získali údaje o výkone za roky 2020 a 2021 s časovým krokom 15 minút.



Obrázok 10: Výkon fotovoltickej elektrárne počas jedného dňa

Na obrázku 10 je znázornený denný priebeh výkonu fotovoltickej elektrárne pre letný slnovrat (modrou krivkou) a zimný slnovrat (oranžová krivka). Vidíme, že výkon elektrárne počas dňa je premenlivý, čo je jedným z deficitov slnečných elektrární. Pri porovnaní modrej a oranžovej krivky tiež vidíme, že v zimnom období je maximálny výkon nižší ako v lete a zároveň doba, počas ktorej dopadajú slnečné lúče na panely je kratšia.

Zrejme najvýznamnejšou charakteristikou každého zdroja energie je účinnosť, s akou dokáže pracovať. My sme na základe satelitných dát určili množstvo energie dopadajúcej na skúmanú elektráreň a tieto hodnoty sme porovnali s jej výkonom. Priemerné účinnosti za jednotlivé mesiace sú zobrazené na obrázku 11. Celková priemerná účinnosť premeny slnečnej energie na elektrickú bola 14,7%, čo zodpovedá účinnosti panelov vyrobených z polykrystalického kremíka.



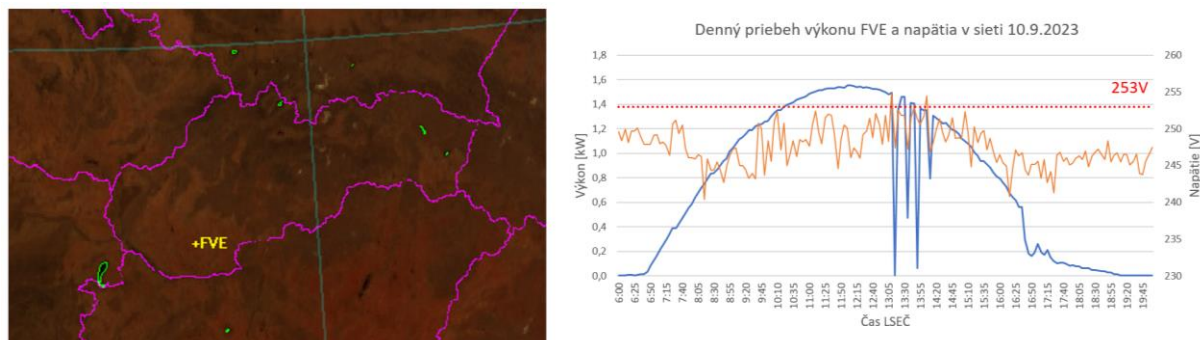
Obrázok 11: Účinnosť fotovoltaickej elektrárne

Na grafe vidíme, že účinnosť bola vyššia v zimných mesiacoch a o čosi nižšia v letných mesiacoch. To je spôsobené uhlom dopadu slnečných lúčov na fotovoltaické panely. Keďže panely elektrárne sú pevne orientované na juh so sklonom 37° , uhol dopadu bol bližšie ku kolmici v zime. Naopak, v lete najmä v ranných a večerných hodinách nastávajú situácie, kedy slnečné lúče dopadajú na zadnú stranu panelov, a teda priame slnečné žiarenie sa na výrobe elektriny vôbec nepodieľa.

Práve pre vyššie uvedený dôvod našou poslednou úlohou bolo stanovenie účinnosti fotovoltaických panelov v prípade, že by boli natáčané kolmo na smer dopadajúcich lúčov. Túto korekciu sme urobili podelením reálneho výkonu elektrárne kosínusom uhla γ , ktorý zvierajú slnečné lúče a normála na povrch panela. Po aplikácii tejto korekcie sme dosiahli účinnosť premeny slnečnej energie na elektrickú energiu na úrovni 19,4%, pričom najväčší nárast výkonu nastal najmä v ranných a večerných hodinách. V praxi sa však takýto systém natáčania fotovoltaických článkov nevyužíva. Po analýze, pri ktorej sa vezmú do úvahy zisky energie vďaka natáčaniu panelov a finančné straty, ktoré sú potrebné na orientáciu panelov počas celého dňa, sa tento koncept stáva nevýhodným. Nehovoriac o potrebe väčšej plochy elektrárne na rozmiestnenie rovnakého počtu fotovoltaických článkov ako by tomu bolo pri klasickom rozmiestnení, keďže pri natáčaní by si tieto panely navzájom tienili slnečnú energiu.

5 Denný priebeh výkonu fotovoltaickej elektrárne (FVE) v porovnaní so satelitnými snímkami

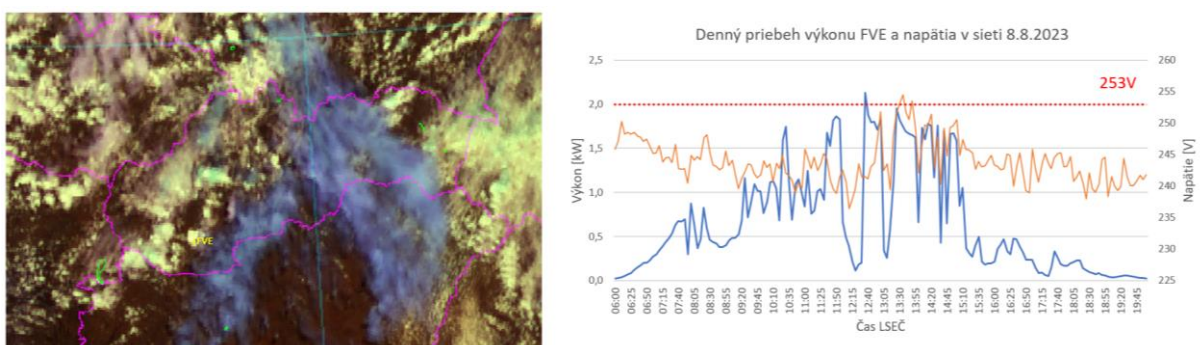
Jedna zo zaujímavých situácií, ktoré sme spracovali, je zo dňa 10.9.2023. Na obrázku 12 vidíme priebeh výkonu fotovoltaickej elektrárne z tohto dňa znázornený modrou krivkou. Oranžová krivka znázorňuje priebeh elektrického napätia v elektrickej sieti. Krivka znázorňujúca výkon vyzerá ako typická výkonová krivka počas bezoblačného dňa, s výnimkou výkyvov, ktoré nastali medzi 13:00 a 14:10 LSEČ. V čase východu Slnka o 6:40 začal stúpať výkon elektrárne a svoje maximum dosiahol o 12:05, pričom toto maximum dosahovalo 1,554 kW. Pri pohľade na oranžovú krivku, predstavujúcu priebeh vonkajšieho napätia, pozorujeme jeho zmenu v rozmedzí od 240 V po 255 V.



Obrázok 12: produkt HRV Near Natural, 13:15 LSEČ, 10.09.2023 (vľavo). Graf výkonu FVE (vpravo)

Keďže sme chceli zistiť, čím sú spôsobené výkyvy výkonu v čase medzi 13:00 a 14:30, pozreli sme sa na družicové snímky z tohto časového intervalu. Na obrázku vľavo je produkt HRV Near Natural z daného dátumu a času, kde oblačnosť je zobrazovaná svetlými odtieňmi na pozadí hnedého zemského povrchu. V bode FVE, ktorý je označený žltou značkou na juhozápade Slovenska, žiadnu oblačnosť nepozorujeme nielen na priloženej snímke, ale ani na časovej postupnosti snímok. Dokazuje to, že tento deň bol slnečný bez výskytu akejkoľvek oblačnosti v sledovanej lokalite.

Vysvetlenie výpadkov výkonu FVE preto musíme hľadať v inej príčine ako prechod oblačnosti ponad FVE. Vráťme sa ku grafu na obrázku 12 a pozrime sa na červenú bodkovanú čiaru, znázorňujúcu hranicu 253 V. Vidíme, že práve v momentoch, kedy dôjde k výpadkom pri výrobe elektriny, dochádza k prekročeniu hranice 253 V. To znamená, že pri dosiahnutí tejto hodnoty napätia elektrárň prestane vyrábať elektrickú energiu. Je to spôsobené povolenou toleranciou z menovitého napätia v elektrickej rozvodnej sieti, ktorá je definovaná v norme STN EN 50160 [4]. Táto tolerancia je $\pm 10\%$, čo pri menovitom napätí 230 V, udáva hranice od 207 V do 253 V. Preto v prípade prekročenia tejto hranice riadiaca elektronika vypne elektrárň a dôjde tak k úplnému zastaveniu výroby. To, že na grafe výkonu niektoré výpadky nesiahajú až na hodnotu 0 kW, je spôsobené tým, že graf je vytvorený z bodov zhotovených z 5-minútových priemerov príslušných hodnôt a vypnutie FVE trvalo menej ako 5 minút. K ešte vierohodnejšiemu overeniu nášho vysvetlenia by nám napomohli časovo hustejšie údaje o výkone FVE, napríklad s frekvenciou 1 minúta, tie žiaľ nemáme k dispozícii.



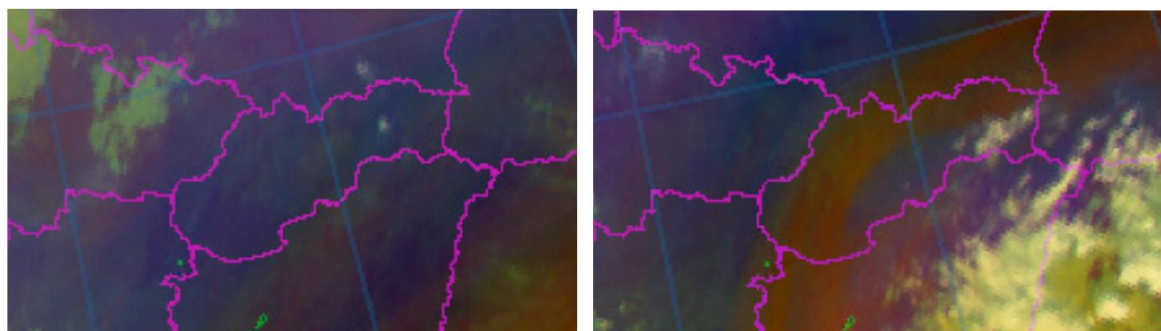
Obrázok 13: produkt HRV Near Natural, 12:20 LSEČ, 08.08.2023 (vľavo). Graf výkonu FVE (vpravo)

Na obrázku 13 je situácia z 8.8.2023. Počas tohto dňa sa nad územím Slovenska nachádzala nízka kopovitá oblačnosť a vysoká oblačnosť. Na grafe výroby FVE vidíme veľkú variabilitu výkonu, ktorá je spôsobená práve prechodom riedkej vysokej oblačnosti, v prípade, keď je výkon znížený približne na polovicu, respektíve prechodom nízkej kopovitej oblačnosti, kedy výkon poklesne o viac ako polovicu. Situácia, kedy sa nad FVE nachádza nízka oblačnosť je zobrazená na obrázku 13 vľavo a korešponduje s výpadkom výkonu, ktorý vidíme na grafe vpravo o 12:20 LSEČ.

6 Závislosť výkonu FVE od vzduchových hmôt

Ako vieme, najvýraznejším meteorologickým faktorom ovplyvňujúcim výrobu FVE je oblačnosť. V prípade, že je atmosféra bezoblačná, najvýznamnejším faktorom ovplyvňujúcim množstvo slnečnej energie dopadajúcej na zemský povrch sa stáva zloženie atmosféry. Pozrime sa teda, ako závisí množstvo vyrobenej elektrickej energie od typu vzduchovej hmoty, ktorá sa nachádza nad FVE. Na toto porovnanie použijeme RGB produkt Airmass. Tento produkt je navrhnutý na monitorovanie distribúcie rôznych vzduchových hmôt a vývoja cyklón. Airmass RGB produkt je kompozitom zo štyroch kanálov SEVIRI: WV6.2, WV7.3, IR9.7 a IR10.8 [5].

Aby sme preskúmali vplyv konkrétneho typu vzduchovej hmoty na výrobu FVE, pripravili sme si zoznam bezoblačných dní. Následne sme v tomto zozname hľadali dva bezoblačné dni nasledujúce za sebou, pretože porovnávať dva dni, medzi ktorými je napríklad týždeň, v tomto prípade nemá zmysel, lebo najväčší vplyv na množstvo vyrobenej elektriny by mala zmenená dĺžka dňa a výška Slnka. Dvojicou dní, kedy je počas jedného dňa nad Slovenskom polárna vzduchová hmota bohatá na ozón (modrá farba) a počas druhého dňa suchá vzduchová hmota (červená farba), je 14. a 15.8.2023.

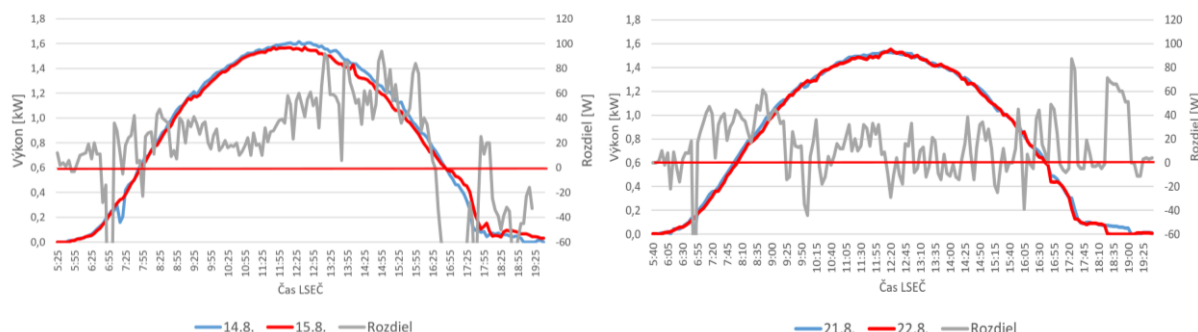


Obrázok 14: produkt Airmass, 12:00 UTC, 14.08.2023 (vľavo) a 15.08.2023 (vpravo)

Na grafe výroby (obrázok 15 vľavo) pozorujeme takmer dokonalé krivky výkonu počas celého dňa, ktoré nie sú narušené žiadnou výraznejšou oblačnosťou. 14.8.2023 bolo vyrobených 11,66 kWh (modrá krivka) a 15.8.2023 bolo vyrobených 11,44 kWh, teda o 0,22 kWh menej, čo predstavuje približne 2 % pokles vo vyrobenej energii. Na grafe tiež jasne vidíme, že modrá krivka (14.8.) dosahuje vyššie hodnoty najmä v popoludňajších hodinách, približne o 80 W viac ako 15.8. Maximum výkonu, ktoré bolo v prvom prípade (14.8.) dosiahnuté o 12:30 LSEČ, má hodnotu 1,615 kW a v druhom prípade (15.8.) v čase 12:40 má hodnotu 1,572 kW. Z tohto príkladu vidíme, že nielen celkové množstvo vyrobenej energie, ale aj maximum výroby energie bolo vyššie v prípade, keď sa FVE nachádzala v modro ofarbenej vzduchovej hmote na produkte Airmass, čo je vzduchová hmota pochádzajúca z polárnych oblastí s nízkym obsahom aerosólov. Keďže vieme, že na účinnosť fotovoltických panelov má vplyv aj teplota, potrebujeme poznať aj údaje o teplote z daných dní. Dňa 14.8. bola najvyššia teplota panelov 45,3°C a dňa 15.8.2023 to bolo 46,2°C. Priebeh teploty panelov počas tejto dvojice dní bol veľmi podobný a rozdiel teploty v jednotlivých časových bodoch nepresahoval 1°C. Aby došlo k pozorovateľnej zmene účinnosti fotovoltických panelov, musel by byť teplotný rozdiel výrazne vyšší ako 1°C. Skutočnosť, že rozdiel teplôt počas tejto dvojice dní bol takmer zanedbateľný, nás oprávňuje tvrdiť, že rozdiel v množstve vyrobenej elektrickej energie je zapríčinený práve odlišným zložením vzduchových hmôt nachádzajúcich sa v dané dni nad FVE. Polárne vzduchové hmoty spravidla obsahujú menšie množstvá aerosólov, a preto prepúšťajú na zemský povrch viac slnečného žiarenia.

Na obrázku 15 vpravo sú pre porovnanie zobrazené priebehy výroby FVE ďalšej dvojice dní. V tomto prípade sa však nad FVE nachádzali v oboch po sebe idúcich dňoch rovnaké vzduchové hmoty, a to studené polárne vzduchové hmoty bohaté na ozón (modrá farba na produkte Airmass). Ako na

obrázku 15 vpravo vidíme, v tomto prípade majú krivky pre oba dni identický priebeh a dosahujú rovnakú maximálnu hodnotu. Z tohto porovnania vyplýva, že skutočne existuje vplyv rôznych vzduchových hmôt na množstvo dopadajúcej energie na zemský povrch a takisto na množstvo vyrobenej elektrickej energie.



Obrázok 15: Grafy výkonu FVE: 14. a 15.8. (vľavo), 21. a 22.8. (vpravo)

Sivé krivky v grafoch výkonu FVE, slúžia na lepšiu ilustráciu rozdielu výkonových kriviek nachádzajúcich sa v jednotlivých grafoch. Zatiaľ čo rozdielová krivka na ľavom grafe ukazuje systematicky vyšší výkon počas dňa 14.8. (polárna vzduchová hmota), rozdielová krivka na druhom grafe osciluje okolo nulovej hodnoty.

7 Referencie

- [Kaňák Peter, Okon Ľuboslav] *Krátkodobá a dlhodobá variabilita slnečného žiarenia podľa plošných satelitných meraní a ich reflexia v solárnej energetike*, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského (2024)
- [Kaňák Peter, Okon Ľuboslav] *Satelitné merania slnečného žiarenia pre hodnotenie využiteľnosti solárnych zariadení*, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského (2022)
- [Huang Guanghui, et al.] *Estimating surface solar irradiance from satellites: Past, present, and future perspectives*, Remote Sensing of Environment 233 (2019)
- [Tkáč Ján, Hvizdoš Marek] *Meranie intenzity slnečného žiarenia*, ELEKTROENERGETIKA, Vol.4, No.4, 2011, Technical University of Košice, ISSN 1337-6756
- [Schmetz Johannes, et al.] *An introduction to Meteosat Second Generation (MSG)*, American Meteorological Society, July 2002
- [Dewitte Steven, et al.] *Centennial Total Solar Irradiance Variation*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022
- [CAPRION D., et al.] *Initial operation of the CM-SAF TOA flux products*, Royal Meteorological Institute of Belgium
- [Aminou D.] *MSG's SEVIRI Instrument*, ESA bulletin 111, 2002
- [Schmid J.] *The SEVIRI Instrument*, ESA/ESTEC, Keplerlaan 1, 2020
- [1] <https://www.kippzonen.com/Knowledge-Center/Theoretical-info/Solar-Radiation>
- [2] <https://www.eumetsat.int/meteosat-second-generation>
- [3] <https://www.eumetsat.int/upcoming-seviri-decontaminations>,
- [4] STN EN 50160/A2: 2020 (33 0121), Charakteristiky napätia elektrickej energie dodávanej z verejnej elektrickej siete. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, 2020.
- [5] SEVIRI Airmass RGB Quick Guide

Scenáre zmien meteorologického sucha na Slovensku

Jaroslava Slavková

Abstract

In this article, we analyze projected changes in meteorological drought characteristics in Slovakia based on regional climate models and two emission scenarios: the moderate RCP 4.5 and the pessimistic RCP 8.5. In accordance with the anticipated increase in air temperature throughout the region, reference evapotranspiration is also expected to rise, with the most significant increases in southwest Slovakia, southern basins in central Slovakia, and southeastern Slovakia. Under the pessimistic RCP 8.5 scenario, the mean annual reference evapotranspiration in these areas may increase by 105 to 115 mm during the 2061–2100 period, compared to 1991–2020.

The difference between reference evapotranspiration and precipitation totals (KUZ), is projected to decrease in regions above 400 m in 2021–2060 and above 500 m in 2061–2100. This trend is expected to be most pronounced in areas where KUZ has historically shown negative values, while positive shifts in KUZ are anticipated in regions with reference evapotranspiration exceeding precipitation totals annually. The largest increase in KUZ is projected in the southern basins of central Slovakia, along with a shift in the positive KUZ boundary to higher altitudes.

Seasonal drought changes suggest that drying will predominantly occur in spring and summer, particularly in lowland areas, which are also Slovakia's key agricultural regions. From mid-altitudes (around 600 m) upwards, a less pronounced decrease in the three-month Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) is expected in spring, along with a clearer increase in SPEI (indicating wetter conditions) in autumn and winter. In the highest altitudes of Slovakia, an increase in mean SPEI values (indicating decreasing drought conditions) is projected across all seasons.

Annotation

In this work, we analyze the projected changes in drought characteristics up to the year 2100 based on outputs from regional climate models. The most significant increase in reference evapotranspiration and the difference between reference evapotranspiration and precipitation totals is expected in the Danubian Lowland and in the southern basins of central Slovakia. Particularly in lower altitudes, the most pronounced drying is anticipated in spring and summer.

Keywords: reference evapotranspiration, Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index, meteorological drought, regional climate models, Central Europe

Anotácia

V práci analyzujeme očakávané zmeny charakteristík sucha do roku 2100 na základe výstupov regionálnych klimatických modelov. Najvýraznejší nárast referenčnej evapotranspirácie a klimatického ukazovateľa zavlaženia sa očakáva na Podunajskej nížine a v kotlinách na juhu stredného Slovenska. Najmä v nižších nadmorských výškach očakávame najvýraznejšie vysušovanie na jar a v lete.

Kľúčové slová: referenčná evapotranspirácia, Štandardizovaný zrážkový a evapotranspiračný index, meteorologické sucho, regionálne klimatické modely, Stredná Európa

1 Úvod

Zmena klímy sa v oblasti strednej Európy spája s nárastom priemernej ročnej teploty zhruba o 2 °C v porovnaní s predindustriálnym obdobím (v letných mesiacoch aj viac) (Škultéty, Szemešová a kol., 2023; APCC, 2014; Potopová, Štěpánek a kol., 2018a), častejšími vlnami horúčav a nárastom počtu vysokých extrémov maximálnej a minimálnej teploty vzduchu (Bednar-Friedl, Biesbroek a kol., 2022). Mení sa tiež časová a priestorová distribúcia atmosférických zrážok a snehovej pokrývky. Na celkovom úhrne atmosférických zrážok v letnom polroku narastá podiel tvorený intenzívnymi privalovými lejakmi, kým v zimnom polroku sa zvyšuje pomer tekutých zrážok na úkor tuhých (Markovič, Pecho a kol., 2020). Zmeny dlhodobějších úhrnov zrážok nie sú výrazné a nie sú postačujúce na to, aby pokryli narastajúci deficit vlhkosti v dôsledku vyššej teploty a evapotranspirácie (Lakatos, Weidinger a kol., 2020). Tým pádom je zrejmé, že v tejto oblasti dochádza aj k zmenám vo výskyte sucha (Bednar-Friedl, Biesbroek a kol., 2022; Škultéty, Szemešová a kol., 2023), aj keď to nie je také jednoznačné ako napríklad v mediteránskej oblasti (Spinoni, Naumann a kol., 2017). V oblasti strednej Európy bol zaznamenaný trend nárastu frekvencie a intenzity meteorologického sucha na jar alebo aj tiahnúc sa od jari do leta; kým v jesenných mesiacoch bol naopak v niektorých oblastiach pozorovaný trend poklesu frekvencie sucha avšak zároveň nárast počtu mesiacov so závažným až extrémnym suchom (Spinoni, Naumann a kol., 2017; Hänsel, Ustrnul a kol., 2019; Potopová, Štěpánek a kol., 2015; Onderka a Pecho, 2023; Labudová, Ivaňáková a kol., 2024). Podobne aj v prípade pôdneho sucha Řehoř poukazuje na nárast frekvencie výskytu v letnom polroku, kým v zimnom polroku neboli zistené štatisticky významné zmeny (Řehoř, 2023).

Na Slovensku je vysušovanie najvýraznejšie v nižšie položených oblastiach (Záhorská nížina a Podunajská nížina, povodie dolného a stredného Váhu, Východoslovenská nížina a Košická kotlina) (Labudová, Ivaňáková a kol., 2024; Nikolova, Nejedlík a kol., 2016; Trnka, Balek a kol., 2016), ktoré sú zároveň aj hlavnou poľnohospodárskou oblasťou krajiny.

Ako možno poukázať aj na dôsledkoch epizód extrémneho sucha, ktoré v posledných rokoch postihli územie Slovenska (napríklad v období od roku 2015 do 2022, ale aj v roku 2024), sucho častokrát zasahuje do poľnohospodárstva (Potopová, Trifan a kol., 2023) a živočíšnej výroby (a samým tým ovplyvňuje aj bezpečnosť potravín) (Török, Dembicz a kol., 2020), vodohospodárstva (Škultéty, Szemešová a kol., 2023), lesníctva (Hlásny, Csaba a kol., 2014), energetiky, či ďalších socioekonomických sektorov (Bednar-Friedl, Biesbroek a kol., 2022).

Stredná Európa nie je hotspotom Európy, čo sa týka scenárov zvyšovania frekvencie a intenzity sucha. Napriek tomu sa podľa najnovšej IPCC správy pri globálnom oteplení o 2°C a viac (v porovnaní s predindustriálnou dobou) očakáva aj v tejto oblasti nárast frekvencie a intenzity sucha, najmä v lete (Seneviratne, Zhang a kol., 2021). Podľa Spinoni, Vogt a kol., 2017 sa v strednej Európe v období 2041-2070 v porovnaní s 1981-2010 očakáva mierny nárast frekvencie výskytu meteorologického sucha avšak pokles intenzity podľa scenárov RCP4.5 ako aj RCP8.5. V období 2071-2100 bude nárast frekvencie sucha o čosi výraznejší než v predchádzajúcom období (pri scenári RCP8.5 ide o nárast frekvencie do 35% v porovnaní s 1981-2010). Podľa scenára RCP8.5 sa v tomto období očakáva aj nárast intenzity sucha (scenár RCP4.5 nárast intenzity nepredpokladá). Čo sa týka sezónneho sucha, v bližšej budúcnosti (2041-2070) ako aj ďalšej budúcnosti (2071-2100) sa podľa tejto štúdie očakáva pokles frekvencie sucha v zime, mierny nárast v jeseň a výrazný nárast na jar. V období ďalšej budúcnosti sa výrazný nárast frekvencie sucha očakáva aj v lete. Rovnaké tendencie platia pre oba analyzované scenáre (RCP8.5 a RCP4.5, pričom scenár RCP8.5 predpokladá výraznejšie zmeny). Analýza tiež uvádza, že uvedené tendencie sú v oblasti pohorí Álp a Karpát výraznejšie než v ich okolitých oblastiach (Spinoni, Vogt a kol., 2017).

Scenármi sucha v oblasti strednej Európy, či v krajinách susediacich so Slovenskom sa na základe výstupov regionálnych klimatických modelov zaoberali napríklad Potopová, Štěpánek a kol., 2018b (scenáre SPI a SPEI indexov v Českej Republike v období vegetačnej sezóny apríl-september podľa RCP4.5 a RCP8.5); Kis, Szabó a kol., 2023 (scenáre De Martone Indexu a Forestry aridity indexu na území Maďarska v letnom polroku podľa RCP4.5 a RCP8.5); Mezösi, Blanka a kol., 2016 (Pálfayov index sucha (PaDI) v juhovýchodnej oblasti Karpatského oblúku podľa A1B scenáru); Haslinger,

Schöner a kol., 2016 (index SPEI v Alpском regióne podľa A1B, A2 a B2 emisných scenárov); Orth, Zscheischler a kol., 2016 (letné úhrny zrážok v oblasti strednej Európy podľa RCP4.5 a RCP8.5); Hari, Rakovec a kol., 2020 (index SPEI v oblasti strednej Európy podľa RCP2.6, RCP4.5 a RCP8.5). Na Slovensku zatiaľ vedecké analýzy scenárov sucha na základe výstupov najaktuálnejších regionálnych klimatických modelov absentujú.

Cieľom tohto článku je analýza sucha v blízkej budúcnosti (2021-2060) a ďalej budúcnosti (2061-2100) v porovnaní s referenčným obdobím (1991-2020) na území Slovenska na základe výstupov regionálnych klimatických modelov konzorcia EURO-CORDEX, pričom budeme brať do úvahy 2 emisné scenáre-RCP 4.5 (prechodný scenár) a RCP 8.5. (extrémne negatívny emisný scenár). Analýza zahŕňa zmenu priemernej ročnej referenčnej evapotranspirácie a klimatického ukazovateľa zavlaženia a zmeny výskytu sucha v jednotlivých ročných obdobiach na základe trojmesačného indexu SPEI.

2 Metodika

2.1 Analyzované charakteristiky sucha a ich spôsob výpočtu

Podmienky sucha v budúcnosti sme analyzovali na základe scenárov zmien ročných súm referenčnej evapotranspirácie a klimatického ukazovateľa zavlaženia, ako aj 3-mesačného indexu SPEI.

2.1.1 Referenčná evapotranspirácia- ET_0

Pod pojmom referenčná evapotranspirácia rozumieme výpar z povrchu, porasteneho referenčnou plodinou, ktorá je vysoká približne 0.12 m, má striktné určenú hodnotou odporu povrchu na difúziu vodnej pary ($R_s = 70 \frac{s}{m}$) a albedo 0.23. Výpar z povrchu s referenčnou plodinou by sa mal približovať k výparu zo zeleného trávnatého povrchu, ktorý je v aktívnom raste, jednotnej výšky, úplne prekrýva pôdu a je dostatočne zavlažovaný (Allen, Smith a kol., 1994). Referenčnú evapotranspiráciu sme počítali metódou FAO 56 Penman-Monteith, ktorá je považovaná za štandardnú metódu výpočtu tejto charakteristiky a okrem teploty vzduchu zohľadňuje pri výpočte aj rýchlosť vetra, množstvo vodnej pary vo vzduchu, či radiačnú bilanciu.

V našej práci porovnávame priemernú ročnú sumu referenčnej evapotranspirácie v referenčnom období 1991-2020 s priemernou ročnou hodnotou pre bližšiu budúcnosť (2021-2060) a ďalšiu budúcnosť (2061-2100).

2.1.2 Klimatický ukazovateľ zavlaženia- KUZ

Klimatický ukazovateľ zavlaženia predstavuje rozdiel medzi referenčnou evapotranspiráciou a úhrnom zrážok. V oblastiach so zápornými hodnotami KUZ teda zrážky v ročnej sume prevyšujú referenčnú evapotranspiráciu a opačne.

Rovnako, ako aj v prípade referenčnej evapotranspirácie, budeme aj v tomto prípade porovnávať priemernú ročnú sumu KUZ v referenčnom období s obdobiami bližšej a ďalšej budúcnosti (2021-2060 a 2061-2100).

2.1.3 3-mesačný, sezónny index sucha SPEI

Vstupným parametrom pre výpočet indexu SPEI je záporná hodnota klimatického ukazovateľa zavlaženia (teda rozdiel zrážok a ET_0). V našej práci sme pracovali s 3-mesačnými hodnotami tejto charakteristiky. Pri 3-mesačnom indexe SPEI išlo teda o sumy tohto rozdielu pre jednotlivé sezóny (zima=december až február, jar=marec až máj, leto=jún až august a jeseň=september až november).

Index SPEI hovorí o tom, či daná hodnota rozdielu zrážok a ET_0 predstavuje pre danú dĺžku indexu a určitú lokalitu normálne alebo skôr extrémne hodnoty v porovnaní s hustotou pravdepodobnosti tohto rozdielu v danej lokalite. Hustota pravdepodobnosti bola v našom prípade určená na základe referenčného obdobia 1991-2020. Podľa odporúčaní v Slavková, Gera a kol., 2023 sme na popis rozdielu zrážok a ET_0 vhodným štatistickým rozdelením použili generalizované extrémálne rozdelenie. Ide o štandardizovaný a normalizovaný index, pričom kladné hodnoty poukazujú na vlhké obdobie, kým záporné hodnoty SPEI predstavujú sucho.

V našej práci sme porovnali priemernú hodnotu trojmesačného indexu SPEI jednotlivých sezón v normálovom období 1991-2020 s priemernými sezónnymi hodnotami SPEI v období bližšej budúcnosti (2021-2060) a v období ďalšej budúcnosti (1961-2100).

2.2 Údaje

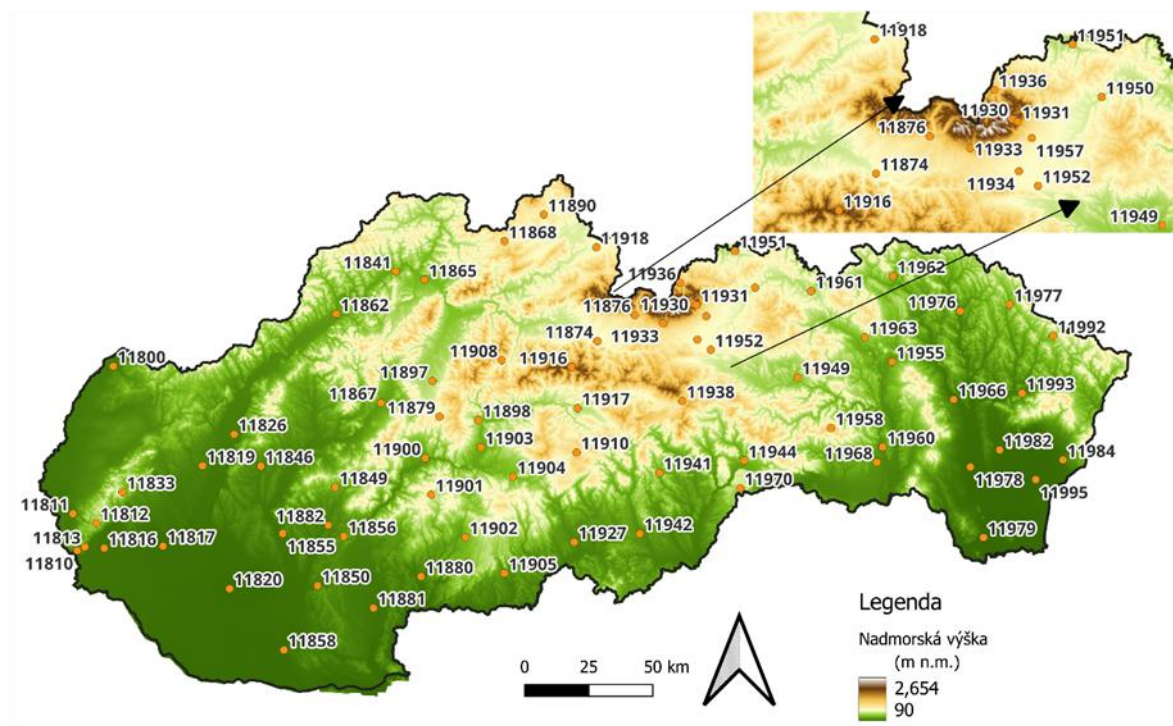
Očakávané zmeny týkajúce sa sucha sme určovali na základe výstupov z regionálnych klimatických modelov. Pracovali sme s piatimi regionálnymi klimatickými modelmi, ktoré sú dostupné v rámci konzorcia EURO-CORDEX. Výber modelov ako aj validácia základných meteorologických veličín, ktoré sme v tejto práci použili na výpočet charakteristík sucha boli spracované v rámci projektu URANOS (Údajová a vedomostná podpora pre systémy rozhodovania a strategického plánovania v oblasti adaptácie poľnohospodárskej krajiny na klimatické zmeny a minimalizáciu degradácie poľnohospodárskych pôd). V našej analýze sme pracovali s údajmi preinterpolovanými do siete 75 staníc (*Obrázok 2*).

Všetky analyzované charakteristiky sucha boli počítané pre každý z piatich regionálnych klimatických modelov zvlášť a následne sme v poslednom kroku vypočítali aritmetický priemer, ktorý uvádzame vo výsledkoch tohto článku.

Pri každom z regionálnych klimatických modelov sme brali do úvahy dva scenáre možného vývoja budúcnosti RCP (Reprezentatívne koncentračné cesty-Representative Concentration Pathway): RCP4.5 (stredný scenár) a RCP8.5 (pesimistický scenár). RCP sú scenáre, ktoré predpokladajú najpravdepodobnejší vývoj emisií skleníkových plynov do atmosféry a celkové radiačné zosilnenie primárne do konca tohto storočia. Sú označené podľa očakávaného celkového zosilnenie skleníkového efektu vo Wattoch na meter štvorcový v roku 2100 v porovnaní s rokom 1750. Ide o zosilnenie o 4.5 W/m² pre scenár RCP4.5, či 8.5 W/m² pri scenári RCP8.5.

Podľa RCP4.5 sa očakáva cielená aktivita zameraná na dosiahnutie stanovenej cieľovej koncentrácie CO₂ a ďalších radiačných plynov. Úroveň emisií by mala podľa tohto scenára vyvrcholiť okolo roku 2040 a následne začať klesať. Nárast globálnej teploty do konca storočia v porovnaní s predindustriálnou dobou bude podľa tohto scenára 2 až 3°C.

Pri RCP8.5 scenári sa očakávajú veľmi vysoké emisie skleníkových plynov, ktoré zodpovedá vývoju emisií bez akýchkoľvek mitigačných opatrení v tomto smere (často sa preto pokladá ako najhorší možný scenár). Na konci storočia sa v tomto prípade očakáva nárast globálnej teploty o 4 až 5°C alebo aj viac.



Obrázok 2: Stanice zahrnuté v analýze očakávaných zmien v súvislosti s výskytom sucha na Slovensku v budúcnosti. Stanice sa nachádzajú v nadmorskej výške od 97 m n.m. (Somotor 11979) po 2635 m n.m. (Lomnický štít 11930). Zoznam staníc, ich názvy a priradené indikativy sú v Tabuľka 5.

Tabuľka 5: Zoznam staníc použitých pri analýze scenárov sucha do budúcnosti: indikativy, názvy staníc a nadmorská výška staníc v m n.m.

indikativ	stanica	nadm. výška	indikativ	stanica	nadm. výška	indikativ	stanica	nadm. výška
11800	Holíč	163	11880	Dudince	139	11942	Rimavská Sobota	215
11810	Bratislava, Mlynská dolina	180	11881	Želiezovce	137	11944	Rožňava	311
11811	Stupava	179	11882	Tesárske Mlyňany	190	11949	Spišské Vlachy	388
11812	Malý Javorník	584	11890	Oravské Veselé	757	11950	Podolíne	566
11813	Bratislava, Koliba	287	11897	Turčianske Teplice	520	11951	Červený Kláštor	469
11816	Bratislava, letisko	133	11898	Banská Bystrica, Zelená	429	11952	Gánovce	703
11817	Kráľová pri Senci	123	11900	Žiar nad Hronom	262	11955	Prešov, vojsko	295
11819	Jaslovské Bohunice	178	11901	Banská Štiavnica	622	11957	Stará Lesná	806
11820	Žihárec	112	11902	Bzovík	352	11958	Kojšovská hoľa	1242
11826	Piešťany	163	11903	Sliač	313	11960	Košice, mesto	207
11833	Modra, Piesok	530	11904	Víglaš, Pstrúša	365	11961	Plaveč	485
11841	Dolný Hričov	309	11905	Dolné Plachtince	192	11962	Bardejov	335
11846	Veľké Ripňany	182	11908	Liptovská Osada	605	11963	Jakubovany	402
11849	Žikava	319	11910	Lom nad Rimavicou	1015	11966	Čaklov	140
11850	Podhájska	145	11916	Chopok	1995	11968	Košice, letisko	230
11855	Nitra, Veľké Janíkovce	135	11917	Brezno	485	11970	Silica	524
11856	Mochovce	261	11918	Liesek	692	11976	Tisinec	216
11858	Hurbanovo	115	11927	Boľkovce	187	11977	Medzilaborce	306
11862	Beluša	255	11930	Lomnický štít	2635	11978	Trebišov-Milhostov	104
11865	Žilina	358	11931	Skalná Pleso	1763	11979	Somator	97
11867	Prievidza	260	11933	Štrbské Pleso	1323	11982	Michalovce	109
11868	Oravská Lesná	785	11934	Poprad	694	11984	Orechová	120
11874	Liptovský Hrádok	640	11936	Tatranská Javorina	1017	11992	Osadné	380
11876	Podbanské	978	11938	Telgárt	906	11993	Kamenica nad Ćir.	176
11879	Kremnické Bane	763	11941	Ratková	312	11995	Vysoká nad Uhom	105

3 Výsledky

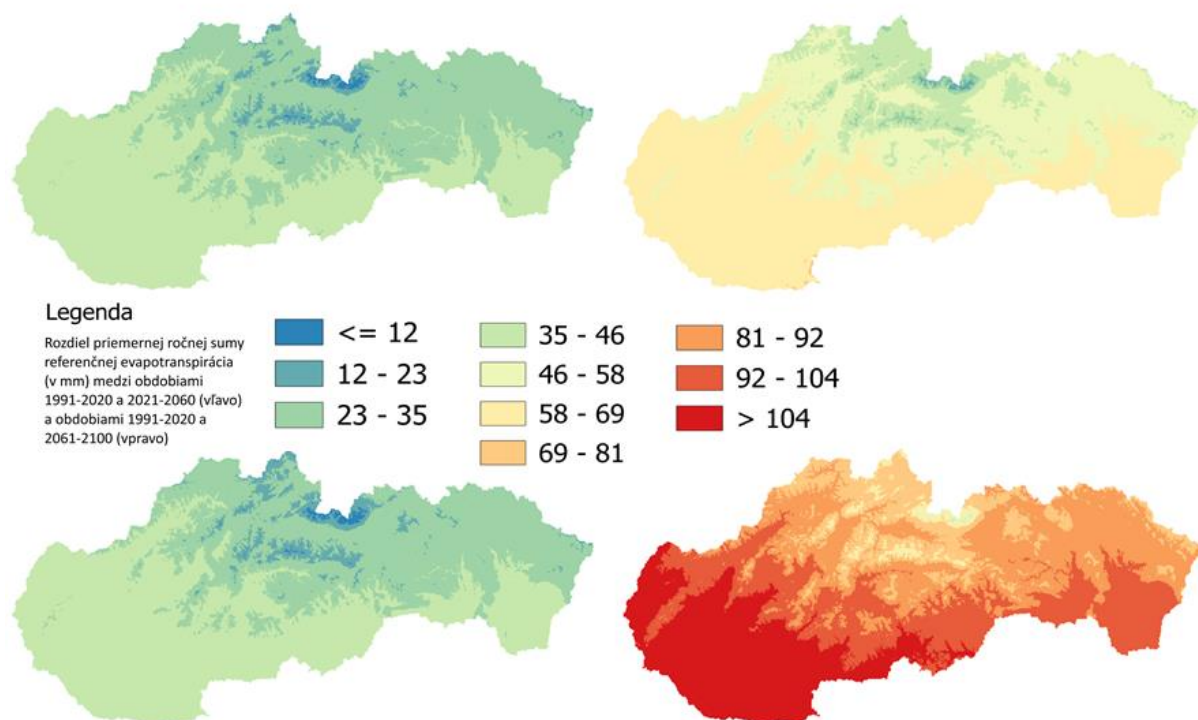
3.1 Referenčná evapotranspirácia- ET_0

V súhlase s nárastom teploty na celom území Slovenska, sa na celom území očakáva aj nárast referenčnej evapotranspirácie (Obrázok 3). Najvýraznejšie vzrastie ročná suma ET_0 na juhozápade Slovenska (na Podunajskej nížine a Záhorí). V období bližšej budúcnosti (2021-2060) podľa oboch RCP scenárov suma ET_0 v tejto oblasti vzrastie o 40-45 mm oproti referenčnému obdobiu 1991-2020. V ďalšej budúcnosti (2061-2100) očakávame na juhozápade Slovenska podľa stredného scenára nárast ročnej ET_0 o približne 65 mm, kým extrémnejší scenár predikuje nárast o 105-115 mm v porovnaní s referenčným obdobím.

Na juhovýchode Slovenska budú v porovnaní s juhozápadom Slovenska zmeny ET_0 zhruba o 5 mm nižšie (v prípade extrémnejšieho scenára RCP8.5. v ďalšej budúcnosti o zhruba 10 mm nižšie). Okrem spomenutých lokalít, vyšší nárast sa očakáva aj v kotlinách v južnej polovici stredného Slovenska. Napríklad v Boľkovciach, či Rimavskej Sobote sa očakáva v ďalšej budúcnosti podľa stredného scenára nárast ET_0 o 66 mm a podľa extrémnejšieho scenára približne o 105 mm.

Najnižšie zmeny ročného úhrnu ET_0 sa očakávajú vo vysokohorských polohách, kde sa očakáva nárast ročnej ET_0 o 4-8 mm v blízkej budúcnosti, kým v ďalšej budúcnosti stredný scenár predpokladá nárast o približne 20 mm a extrémnejší scenár nárast o zhruba 50 mm.

V porovnaní s trendom ET_0 v období 1961-2010 (v Lakatos, Weidinger a kol., 2020) je nami určený trend nárastu ET_0 v budúcnosti na juhozápade Slovenska o čosi nižší než v minulosti, kým v ostatných častiach Slovenska sú nami určené zmeny v budúcnosti a trendy v minulom období približne rovnaké. V spomenutej štúdii bola použitá rovnaká metóda výpočtu ET_0 ako v našej práci.



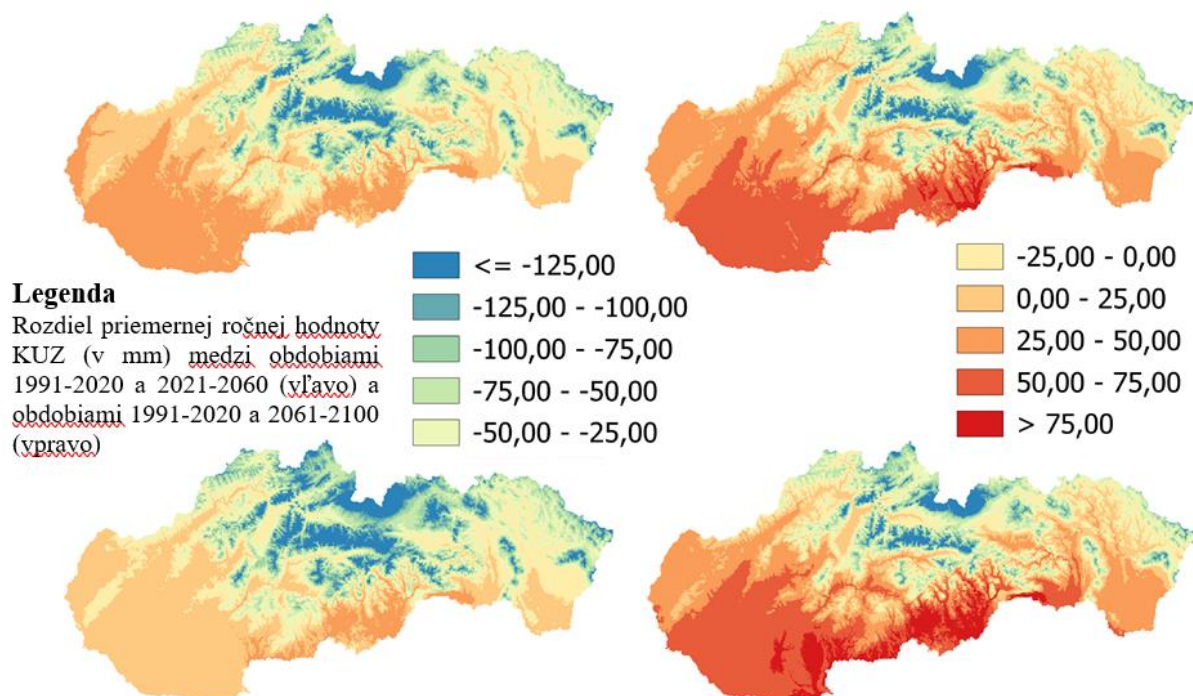
Obrázok 3: Zmena ročného úhrnu referenčnej evapotranspirácie (v mm) podľa scenárov RCP4.5 (hore) a RCP8.5 (dole) v bližšej budúcnosti 2021-2060 (vľavo) a ďalšej budúcnosti 2061-2100 (vpravo) oproti normálovému obdobiu 1991-2020. Priestorová interpolácia bola vykonaná interpolačnou metódou „kriging with external drift“.

3.2 Klimatický ukazovateľ zavlaženia-KUZ

V budúcnosti sa podľa našej analýzy očakáva pokles KUZ oproti normálovému obdobiu 1991-2020 približne v oblastiach nad 400 m (v bližšej budúcnosti) resp. nad 500 m (v ďalšej budúcnosti). Výnimkou je východné Slovensko, kde sa pokles KUZ prejavil aj v oblastiach s nadmorskou výškou 100-200 m (*Obrázok 4*). Vzhľadom na rozloženie KUZ v normálovom období 1991-2020 môžeme zhruba zhodnotiť, že pokles tejto charakteristiky sa očakáva práve v lokalitách jej zápornej hodnoty (teda tam, kde aj v minulosti zrážky prevyšovali nad referenčnou evapotranspiráciou), kým nárast KUZ sa prejaví v oblasti so zápornými hodnotami (čiže v oblastiach kde referenčná evapotranspirácia prevyšuje úhrn zrážok, teda v oblastiach zhruba pod 500 m). Výsledky však tiež naznačujú postupné posúvanie hranice, kde referenčná evapotranspirácia prevyšuje zrážky v ročnom úhrne, smerom k vyšším nadmorským výškam.

Najväčší nárast KUZ sa v budúcnosti očakáva okrem Podunajskej nížiny, tiež aj v kotlinách v južnej polovici stredného Slovenska, kde scenáre v ďalšej budúcnosti predpokladajú nárast KUZ až do 65mm (RCP 4.5), resp. do 90 mm (RCP 8.5). Vzhľadom na to, že najvýraznejší nárast referenčnej evapotranspirácie sa očakáva na juhozápade Slovenska (*Obrázok 3*), zvýraznenie juhu stredného Slovenska pri analýze zmien KUZ (*Obrázok 4*) súvisí s nižším nárastom zrážok v tejto oblasti (v porovnaní napríklad s juhozápadom, či inými časťami Slovenska).

Najvýraznejšie záporné zmeny KUZ sa očakávajú vo vysokohorskom prostredí a v polohách nad 1000 m, kde sa v porovnaní s normálovým obdobím 1991-2020 predpokladá (v blízkej a aj ďalšej) budúcnosti pokles KUZ o viac ako 100 mm. Pokles KUZ o 75 mm a viac v porovnaní s normálovým obdobím sa podľa našej analýzy v prípade blízkej budúcnosti zároveň vyskytne na väčšom území než v ďalšej budúcnosti (výraznejšie v prípade RCP8.5). Takéto zmeny sú pravdepodobne výsledkom kombinácie viacerých faktorov. Jednak napríklad modely podľa scenára RCP8.5 naznačujú v blízkej budúcnosti vo vysokohorskom prostredí o čosi vyššie úhrny zrážok než v ďalšej budúcnosti. Zároveň môžu byť nižšie rozdiely KUZ v ďalšej budúcnosti podporené zvýšenou referenčnou evapotranspiráciou aj v prostredí vyšších nadmorských výšok.



Obrázok 4: Zmena ročného úhrnu klimatického ukazovateľa zavlaženia (v mm) podľa scenárov RCP4.5 (hore) a RCP8.5 (dole) v bližšej budúcnosti 2021-2060 (vľavo) a ďalšej budúcnosti 2061-2100 (vpravo) oproti normálovému obdobiu 1991-2020. Priestorová interpolácia bola vykonaná interpolačnou metódou „kriging with external drift“.

3.3 3-mesačný, sezónny index sucha SPEI

V súlade s trendami sezónneho sucha na území Slovenska v poslednom období (Labudová, Ivaňáková a kol., 2024) badáme aj pri scenároch sucha vo všeobecnosti vysušovanie na jar a v lete a pokles sucha na jeseň a v zime. Stanice boli pre účely našej analýzy zoradené do 6 klastrov (*Tabuľka 6*) podľa ročnej sumy klimatického ukazovateľa zavlaženia v období 1991-2020.

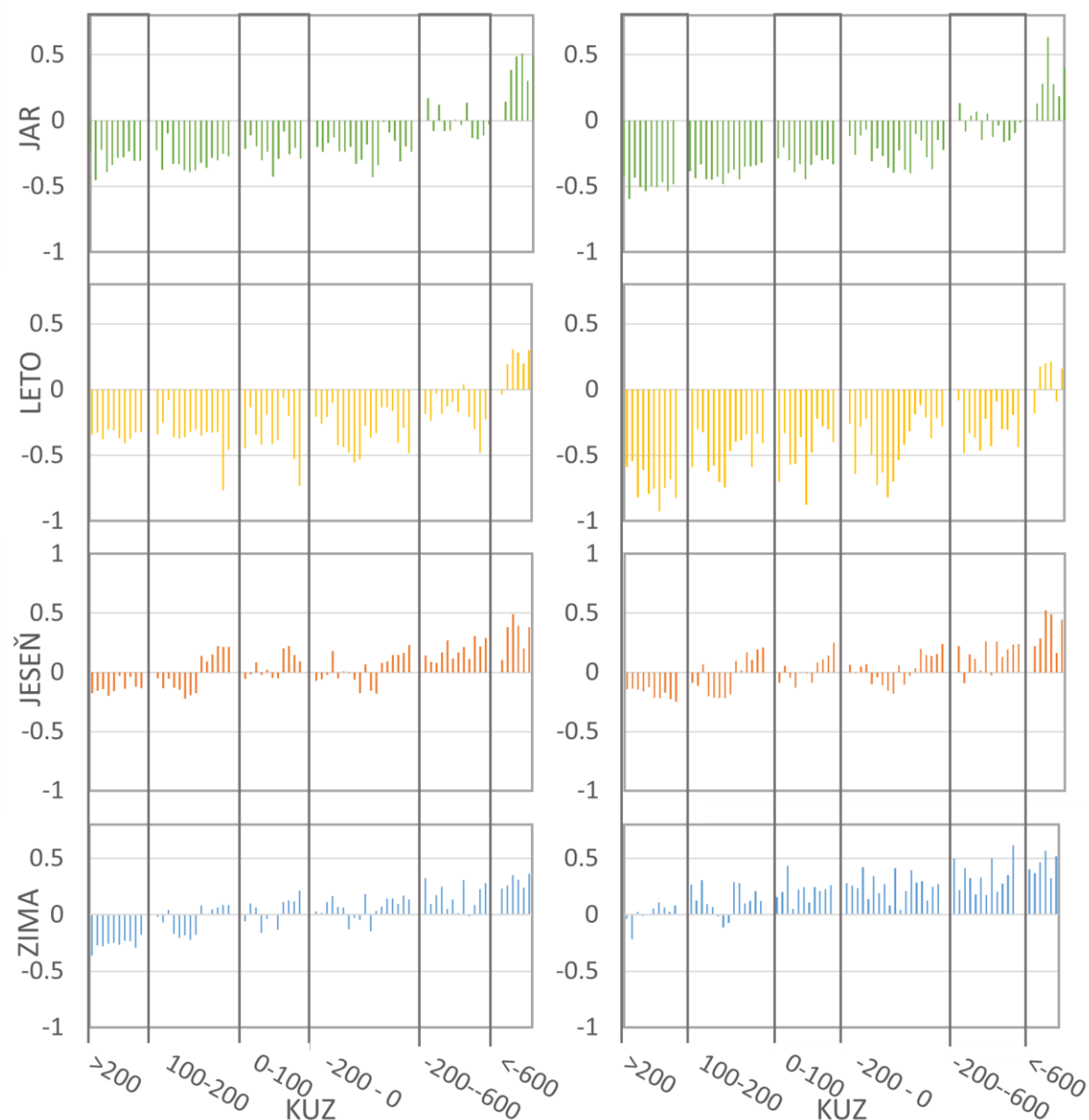
Najvýraznejší pokles 3-mesačného indexu SPEI sa podľa tejto analýzy objaví na jar a v lete a najmä v nižšie položených lokalitách. Na rozdiel od ostatných častí Slovenska na Podunajskej nížine a v priľahlej oblasti vidno jednoznačný trend vysušovania aj na jeseň. Labudová a kol. pri analýze trendov 3-mesačného indexu SPEI v období 1961-2020 uvádzajú, že 3-mesačné sucho na jeseň sa síce objavuje zriedkavejšie, ale jeho intenzita sa zvyšuje (Labudová, Ivaňáková a kol., 2024). Je preto možné, že nami detegovaný pokles priemernej jesennej hodnoty SPEI v prvom a druhom klastri staníc nie je spôsobený zvýšenou frekvenciou sucha na jeseň, ale zvýšenou intenzitou sucha v prípade jeho výskytu. Zároveň naše výsledky poukazujú, že by v tejto lokalite mohlo dochádzať k vysušovaniu aj počas zimy.

Do tretej (KUZ 0 až 100 mm) a štvrtej (KUZ -200 až 0 mm) skupiny staníc patria stanice na strednom a východnom Slovensku v nadmorskej výške zhruba do 600 m (okrem Juhoslovenskej kotliny, Košickej kotliny a Východoslovenskej nížiny). Pri týchto skupinách taktiež pozorujeme pokles indexu SPEI na jar a aj v lete. V zime v uvedených oblastiach 3. a 4. klastru sa očakáva nárast indexu (zvlhčenie), pričom uvedený nárast bude o čosi nižší než pri 5. a 6. skupine staníc.

Do piatej skupiny staníc (KUZ od -600 po -200 mm) patria zväčša stanice v stredných polohách (zhruba od 600 do 1000 m nadmorskej výšky) na strednom Slovensku, ako aj niektoré stanice v severnej polovici východného Slovenska. Aj pre túto skupinu staníc je príznačný nárast indexu SPEI (vlhšie podmienky) na jeseň a v zime ale zároveň menej výrazný pokles indexu SPEI na jar (v porovnaní s predchádzajúcimi skupinami staníc). V lete sa rovnako aj pri tejto skupine staníc očakáva vysušovanie avšak tento trend tiež nie je taký výrazný a jednoznačný ako pri predchádzajúcich kategóriách.

Posledný klastor (KUZ < -600 mm) tvoria stanice v oblasti Vysokých Tatier, Nízkych Tatier (Chopok) a stanica Oravská Lesná. Pre túto skupinu staníc je príznačný nárast hodnoty SPEI (pokles sucha) vo všetkých štyroch ročných obdobiach.

Pri analýze scenárov 3-mesačného sucha nesmieme zabúdať na to, že ide o pomerne krátke obdobie počas ktorého môže byť celkový úhrn zrážok obsiahnutý napríklad iba v jednej extrémnej zrážkovej udalosti. Index SPEI tak celkovo toto obdobie môže ohodnotiť ako normálne, či dokonca vlhké napriek tomu, že reálna vlhkosť pôdy nebude tento stav odzrkadľovať. V našej práci sme však pracovali s priemerami sezónnych indexov sucha za 40-ročné obdobia, vďaka čomu sme čiastočne eliminovali vplyvy jednotlivých extrémnych zrážkových udalostí.



Obrázok 5: Zmena priemernej hodnoty trojmesačného indexu SPEI pre ročné obdobia v ďalšej budúcnosti (2061-2100) oproti normálovému obdobiu (1991-2020) podľa emisného scenára RCP4.5 (vľavo) a emisného scenára RCP8.5 (vpravo). Stanice sú pre lepšiu vizualizáciu zoradené do klastrov na základe ročnej sumy klimatického ukazovateľa zavlaženia (KUZ) v mm (Tabuľka 6). Podobné (avšak o čosi menej výrazné) rozloženie zmien badať aj pri porovnaní bližšej budúcnosti (2021-2060) s normálovým obdobím.

Tabuľka 6: Zoradenie staníc do klastrov podľa ročnej hodnoty klimatického ukazovateľa zavlaženia (KUZ)

	ročná suma KUZ (v mm)					
	>200	100-200	0-100	-200 - 0	-200--600	<-600
1	BA, Ml. dolina	Žikava	Prievidza	Dolný Hričov	Podbanské	Oravská Lesná
2	Stupava	Holíč	Modra, Piesok	Beluša	Kremnické Bane	Chopok
3	BA, Koliba	Malý Javorník	Žiar n/Hronom	Žilina	Oravské Veselé	Lomnický štít
4	BA, letisko	Mochovce	Bzovík	Liptovský Hrádok	Liptovská Osada	Skalnaté Pleso
5	Kráľ. pri Senci	Dudince	Poprad	Turčianske Teplice	Lom n/Rimavicou	Štrbské Pleso
6	Jasl. Bohunice	Dolné Placht.	Rožňava	B. Bystrica, Zelená	Liesek	Tatranská Jav.
7	Žihárec	Boľkovce	Gánovce	Banská Štiavnica	Telgárt	
8	Piešťany	Rim. Sobota	Prešov, vojsko	Sliach	Červený Kláštor	
9	Veľké Ripňany	Košice, mesto	Jakubovany	Víglaš, Pstruša	Stará Lesná	
10	Podhájska	Košice, letisko	Čaklov	Brezno	Kojšovská hoľa	
11	Nitra, Veľké Jan.	Trebišov-Milh.	Orechová	Ratková	Medzilaborce	
12	Hurbanovo	Somotor		Spišské Vlachy	Osadné	
13	Želiezovce	Michalovce		Podolíneč		
14	Tesárske Ml.	Vys. n/Uhom		Plaveč		
15				Bardejov		
16				Silica		
17				Tisinec		
18				Kam. n/Cirochou		

4 Záver

V súlade s nárastom teploty vzduchu na celom Slovensku očakávame aj nárast referenčnej evapotranspirácie. Najvýraznejší nárast tejto charakteristiky sa podľa regionálnych klimatických scenárov prejaví na juhozápade Slovenska, v kotlinách južnej polovice stredného Slovenska a na juhovýchode Slovenska. Pri naplnení pesimistického emisného scenára (RCP 8.5) môže priemerná ročná hodnota referenčnej evapotranspirácie v tejto lokalite v období 2061-2100 vzrásť aj o 105 až 115 mm v porovnaní s obdobím 1991-2020.

Pokles klimatického ukazovateľa zavlaženia (rozdielu medzi referenčnou evapotranspiráciou a úhrnom zrážok) sa vzhľadom na obdobie 1991-2020 očakáva v oblastiach nad 400 m (v období 2021-2060) resp. v oblastiach nad 500 m (v období 2061-2100). Pokles KUZ teda očakávame zhruba v lokalitách, kde táto charakteristika aj v minulosti dosahovala záporné hodnoty, kým jej nárast sa prejaví v lokalitách, kde referenčná evapotranspirácia v ročnom chode prevyšuje úhrn zrážok. Najvýraznejší nárast KUZ sa očakáva v kotlinách na juhu stredného Slovenska. Očakávame však tiež aj posun hranice s kladnou hodnotou KUZ smerom do vyšších nadmorských výšok.

Čo sa týka zmien sezónneho sucha, vo všeobecnosti sa vysušovanie prejaví najmä na jar a v lete. Tento trend je najvýraznejší v nižšie položených lokalitách (ktoré sú zároveň hlavnými poľnohospodárskymi oblasťami Slovenska). Od stredných polôh (zhruba od 600 m) očakávame menej výrazný pokles indexu SPEI (vysušovanie) na jar a zároveň jednoznačnejší nárast indexu (vlhšie podmienky) na jeseň a v zime. V najvyššie položených oblastiach Slovenska sa očakáva nárast priemernej hodnoty SPEI (pokles sucha) vo všetkých 4 ročných obdobiach.

Použitá literatúra

ALLEN, R. G., M. SMITH, Luis S. PEREIRA a A. PERRIER, 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID bulletin*. 1994, roč. 43, č. 2, s. 1–34.
 APCC, 2014. *Austrian Assessment Report Climate Change 2014 (AAR14): Synopsis – Main Findings. Austrian Panel on Climate Change (APCC)* [online]. Dostupné na: https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/03_Aktivitaeten/APCC/summarys/Synopse_e

nglisch_finaleversion_181214.pdf

BEDNAR-FRIEDL, B., R. BIESBROEK, D.N. SCHMIDT, P. ALEXANDER, K.Y. BØRSHEIM, J. CARNICER, E. GEORGOPOULOU, M. HAASNÖT, G. Le COZANNET, P. LIONELLO, O. LIPKA, C. MÖLLMANN, V. MUCCIONE, T. MUSTONEN, D. PIEPENBURG a L. WHITMARSH, 2022. *Europe*. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [online]. Dostupné na: doi:10.1017/9781009325844.015

HÄNSEL, Stephanie, Zbigniew USTRNUL, Ewa LUPIKASZA a Petr SKALAK, 2019. Assessing seasonal drought variations and trends over Central Europe. *Advances in Water Resources* [online]. 2019, roč. 127, s. 53–75. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.005

HARI, Vitall, Oldrich RAKOVEC, Yannis MARKONIS, Martin HANEL a Rohini KUMAR, 2020. Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Scientific Reports* [online]. 2020, roč. 10, č. 12207. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9

HASLINGER, Klaus, Wolfgang SCHÖNER a Ivonne ANDERS, 2016. Future drought probabilities in the Greater Alpine Region based on COSMO-CLM experiments—spatial patterns and driving forces. *Meteorologische Zeitschrift*. 2016, roč. 25, s. 137–148.

HLÁSNY, Tomáš, Mátyás CSABA, Rupert SEIDL, Ladislav KULLA, Katarína MERGANIČOVÁ, Jiří TROMBIK, Laura DOBOR, Zoltán BARCZA a Bohdan KONÓPKA, 2014. Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Lesnícky časopis* [online]. 2014, roč. 60, č. 1, s. 5–18. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.2478/forj-2014-0001

KIS, Anna, Péter SZABÓ a Rita PONGRÁCZ, 2023. Spatial and temporal analysis of drought-related climate indices for Hungary for 1971–2100. *Hungarian Geographical Bulletin* [online]. 2023, roč. 72, č. 3. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.15201/hungeobull.72.3.2

LABUDOVÁ, Livia, Gabriela IVANÁKOVÁ, Pavol FAŠKO, Peter KAJABA a Martin LABUDA, 2024. Changes in drought occurrence and intensity in the context of climate change in Slovakia. *Theoretical and Applied Climatology* [online]. 2024, roč. 155, č. 5, s. 1–14. Dostupné na: doi:10.1007/s00704-024-04864-3

LAKATOS, Monika, Tamas WEIDINGER, Lilla HOFFMANN, Zita BIHARI a Ákos HORVÁTH, 2020. Computation of daily Penman–Monteith reference evapotranspiration in the Carpathian Region and comparison with Thornthwaite estimates. *Advances in Science and Research* [online]. 2020, roč. 16, s. 251–259. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.5194/asr-16-251-2020

MARKOVIČ, Ladislav, Jozef PECHO a Pavol FAŠKO, 2020. Zmeny v skupenskom zastúpení atmosférických zrážok v zime na území Slovenska. *Meteorologické Zprávy* [online]. 2020, č. 73, s. 19–26. Dostupné na:

https://www.researchgate.net/publication/341592220_Zmeny_v_skupenskom_zastupeni_atmosfericky_ch_zrazok_v_zime_na_uzemi_Slovenska_Changes_in_phase_of_precipitation_during_winter_in_Slovakia

MEZÖSI, Gábor, Viktória BLANKA, Zsuzsanna LADÁNYI, Teodóra BATA, Petru URDEA, Anna FRANK a Burghard C. MEYER, 2016. Expected mid- and long-term changes in drought hazard for the south-eastern Carpathian basin. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2016, roč. 11, č. 2, s. 355–366.

NIKOLOVA, Nina, Pavol NEJEDLÍK a Milan LAPIN, 2016. Temporal variability and spatial distribution of drought events in the lowlands of Slovakia. *Geofizika* [online]. 2016, roč. 33. Dostupné na: doi:10.15233/gfz.2016.33.10

ONDERKA, Milan a Jozef PECHO, 2023. On how precipitation-temperature coupling affects drought severity in the western Carpathians and the adjacent northern part of the Pannonian Plain. *Theoretical and Applied Climatology* [online]. 2023, roč. 152, s. 681–692. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.1007/s00704-023-04395-3

ORTH, René, Jakob ZSCHEISCHLER a Sonia I. SENEVIRATNE, 2016. Record dry summer in 2015 challenges precipitation projections in Central Europe. *Scientific Reports* [online]. 2016, roč. 6, č. 28334. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.1038/srep28334

POTOPOVÁ, Vera, Petr ŠTĚPÁNEK, Martin MOŽNÝ, Luboš TÜRKOTT a Josef SOUKUP, 2015. Performance of the standardised precipitation evapotranspiration index at various lags for agricultural

- drought risk assessment in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2015, roč. 202, s. 26–38 [cit. 15. apríl 2019]. ISSN 0168-1923. Dostupné na: doi:10.1016/J.AGRFORMET.2014.11.022
- POTOPOVÁ, Vera, Petr ŠTĚPÁNEK, Pavel ZAHRADNÍČEK, Aleš FARDA, Luboš TÜRKTÖTT a Josef SOUKUP, 2018a. Projected changes in the evolution of drought on various timescales over the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. *International Journal of Climatology* [online]. 2018, roč. 38, s. e939–e954. ISSN 10970088. Dostupné na: doi:10.1002/joc.5421
- POTOPOVÁ, Vera, Petr ŠTĚPÁNEK, Pavel ZAHRADNÍČEK, Aleš FARDA, Luboš TÜRKTÖTT a Josef SOUKUP, 2018b. Projected changes in the evolution of drought on various timescales over the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. *International Journal of Climatology* [online]. 2018, roč. 38, č. S1, s. e939–e954. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.1002/joc.5421
- POTOPOVÁ, Vera, T. TRIFAN, Miroslav TRNKA, C. DE MICHELE, Daniela SEMERÁDOVÁ, M. FISCHER, J. MEITNER, M. MUSIOLKOVÁ, N. MUNTEAN a B. CLOTHIER, 2023. Copulas modelling of maize yield losses – drought compound events using the multiple remote sensing indices over the Danube River Basin. *Agricultural Water Management* [online]. 2023, roč. 280, č. 108217. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108217
- ŘEHOŘ, Ján, 2023. *Soil drought variability in Central Europe and its circulation drivers*. B.m. Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita.
- SENEVIRATNE, S.I., X. ZHANG, M. ADNAN, W. BADI, A. DERECHYNSKI, A. DI LUCA, S. GHOSH, I. ISKANDAR, J. KOSSIN, S. LEWIS, F. OTTO, I. PINTO, M. SATOH, S. M. VICENTE-SERRANO, M. WEHNER a B. ZHOU, 2021. *Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [online]. Dostupné na: doi:10.1017/9781009157896.013
- ŠKULTÉTY, Jozef, Janka SZEMEŠOVÁ, Miroslava DANČOVÁ, Ľudmila CHOVANCOVÁ, Anna HINEROVÁ, Lenka MALATINSKÁ, Lucia THUMOVÁ, Viera ŠPALKOVÁ, Mário GNIDA, Vladimír PAVLOVIČ, Katarína MIKULOVÁ, Lenka ZETOCHOVÁ, Kristína TONHAUZER, Pavel ŠTASTNÝ, Marcel ZEMKO, Ján HORVÁTH, Boris GREGUŠKA, Emília BUDIŠOVÁ, Peter DROTÁR, Stanislav KONEČNÝ, Marta MOSNÁ, Radoslav POVAŽAN, Tibor PRIWITZER, Michal VANČO a Ivan BARKA, 2023. *The Eight National Communication of the Slovak Republic on Climate Change: Under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol* [online]. Dostupné na: https://oeab.shmu.sk/app/cmsSiteBoxAttachment.php?ID=134&cmsDataID=0
- SLAVKOVÁ, Jaroslava, Martin GERA, Nina NIKOLOVA a Cyril SIMAN, 2023. Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index Approach for Drought Assessment in Slovakia-Statistical Evaluation of Different Calculations. *Atmosphere* [online]. 2023, roč. 14, č. 1464. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.3390/atmos14091464
- SPINONI, Jonathan, Gustavo NAUMANN a Jürgen V. VOGT, 2017. Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Global and Planetary Change* [online]. 2017, roč. 148, s. 113–130. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013
- SPINONI, Jonathan, Jürgen V. VOGT, Gustavo NAUMANN, Paulo BARBOSA a Alessandro DOSIO, 2017. Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology* [online]. 2017, roč. 38, č. 4, s. 1718–1736. Dostupné na: doi:https://doi.org/10.1002/joc.5291
- TÖRÖK, Péter, Iwona DEMBICZ, Zora DAJČ-STEVANOVIC a Anna KUZEMKO, 2020. Grasslands of Eastern Europe. V: *Encyclopedia of the World's Biomes*. s. 703–713. ISBN 9780128160978.
- TRNKA, Miroslav, Jan BALEK, Petr ŠTĚPÁNEK, Pavel ZAHRADNÍČEK, Martin MOŽNÝ, Josef EITZINGER, Zdeněk ŽALUD, Herbert FORMAYER, Maroš TURŇA, Pavol NEJEDLÍK, Daniela SEMERÁDOVÁ, Petr HLAVINKA a Rudolf BRÁZDIL, 2016. Drought trends over part of Central Europe between 1961 and 2014. *Climate Research* [online]. 2016, roč. 70, č. Heim 2002, s. 143–160. Dostupné na: doi:10.3354/cr01420

Predpoved' sekvencie meteorologických prvkov neurónovými siet'ami

Bc. Martin Vozár

Abstract

Point-wise meteorological data is a valuable input for further processing, e.g. to improve analyses or predictions.

We implement, compare, and examine limitations of relatively simple Neural Networks (cca. 200k parameters) optimized for sequential prediction of 24 following hourly timesteps based on previous 24 hourly inputs. Each time step consists of a vector of meteorological station measurement data.

Motivation to examine point-wise data is described, as well as basic formulations of some of the concepts of Neural Networks.

Annotation

Sequences of meteorological data in multiple single points is useful in estimation of local phenomena. In this paper, we implemented optimization process of Neural Networks: FFCN, LSTM, and Transformer for the task of 24-hour prediction, based on 24-hour input.

Key words: sequential data, FFCN, LSTM, Transformer, point-wise data

Abstrakt

Bodové merania meteorologických prvkov sú hodnotným údajom vstupujúcim do ďalšieho spracovania. Napríklad pre spresnenie analýz, či predpovedí.

Implementujeme, porovnávame a preskúmavame limitácie jednoduchších neurónových sietí (cca. 200K parametrov) optimalizovaných na sekvenčnú predpoved' nasledujúcich 24 hodinových krokov na základe predošlých 24 hodinových krokov. Každý časový krok je vektorom staničných meraní.

Popisujeme základnú formuláciu niektorých konceptov a mechanizmov neurónových sietí, ako aj motiváciu venovať sa bodovým dátam,

Annotácia

Sekvencie meteorologických prvkov v množine statických bodov sú užitočnou informáciou pri odhadovaní lokálnych javov. Implementujeme optimalizáciu neurónových sietí FFCN, LSTM a Transformer na úlohu predpovede 24 hodín na základe 24 hodinového vstupu, pre každý bod individuálne.

Kľúčové slová: sekvenčné dáta, FFCN, LSTM, Transformer, bodové dáta

1 Terminológia

Strojové učenie (Machine Learning): Vedecká disciplína zaoberajúca sa programovaním modelov schopných porozumieť systémom bez ich explicitného pomenovania. (Samuel, 1959)

Hlboké učenie (Deep Learning): Keď je [výpočtový] graf hlboký, pozostávajúci z mnohých, na seba naskladaných vrstiev, hovoríme o hlbokom učení. (Goodfellow, Bengio a Courville, 2016)

Architektúra, ML model: Výpočtový graf, bežne rámcovo $10^3 - 10^{10}$ parametrov. Pod modelom v praxi rozumieme aj súbor hodnôt týchto parametrov (váhy).

Metrika: Kritérium posudzovania kvality modelu. Jednoduchý príklad je stredná kvadratická chyba (MSE), komplikovanejšie napr. binárna krížová entropia (BCE), či multiškálová štruktúrálna podobnosť (MSSIM). V praxi môžeme metriku vnímať aj s asociovanými vstupmi, napr.: $MSE(\hat{y}, y)$. V prípade výpočtu pomocou viacerých metrík hovoríme o kompozitnej metrike.

Rekurentná sieť: Cez ten istý výpočtový graf prejdú po sebe dáta v sekvencii. Každým výpočtom sa aktualizuje hodnota stavu bunky.

Transformer: Názov pre špecifický typ výpočtového grafu, pôvodne vyvinutého na predspracovanie obrazových dát (Vision Transformer). Využíva tzv. attention mechanizmus. (Vaswani et al., 2023)

2 Motivácia

Súčasný rozvoj využitia neurónových sietí v meteorológii sa venuje najmä emulovaniu globálnych fyzikálnych numerických predpovedných modelov. Viaceré predpovedné ML modely sú pomerne dobre schopné predvídať javy na synoptických a väčších škálach. (Lam et al., 2023) (Pathak et al., 2022)

Okrem toho existujú aj snahy o vývoj ML modelov zameraných na krátkodobé, lokálne predpovede. (Wang et al., 2017) (Kumar, 2023)

V oboch prípadoch, ako aj v ďalších prácach aplikujúcich metódy DL na meteorologické dáta je zvyčajná tendencia zachovávať čo najvyššiu kvalitu dát. Tá však často v reálnych podmienkach nemusí byť dosiahnuteľná. O to závažnejšie sa môže tento problém prejavovať, pokiaľ je cieľom predvídať lokálne, krátkodobé zmeny, procesy a extrémny.

V snahe hlbšie prakticky preskúmať možnosti predpovede bodových dát budeme porovnávať niekoľko relatívne jednoduchých a výpočtovo nenáročných architektúr neurónových sietí. Budeme pracovať s čo najmenej upravovanými dátami z meteorologických staníc. Výstupy dostatočne robustnej siete by mohli byť použité ako dáta pre zlepšenie analýz, či predpovedí. (napr.: nowcasting, downscaling, interpolácia, overovanie kvality, štatistický post-processing) (Lerch a Polsterer, 2022)

Jedným z dôvodov voľby jednoduchších architektúr je škálovanie komplexnosti zvolenej architektúry voči veľkosti a kvalite dát. V prípade použitia nad mieru komplexnej siete môže pomerne ľahko nastať tzv. *overfitting*.

Vtedy vie výsledný ML model dobre predikovať iba prípady podobné vstupom pri optimalizácii. Pri pokuse o extrapoláciu bude však nespoľahlivý. Nakoľko chceme, aby bol výsledný model robustný aj voči dátam nižšej kvality, jedným z cieľov je tomuto problému predchádzať a dosiahnuť čo najvyššiu schopnosť generalizácie.

Druhým, skôr praktickým dôvodom, je rýchlejší proces optimalizácie jednoduchších ML modelov. To následne umožňuje vykonať viac experimentov, preskúmať väčšie množstvo konfigurácií, a v kratšom čase prísť k lepšiemu výsledku.

Schopnosť predikovať časové rady vektorov je taktiež vhodným prípravným krokom na predpoveď viacrozmerných údajov, ktoré sa dajú rôznymi metódami zredukovať do vektorového tvaru.

3 Teoretický úvod

3.1 Neurónová sieť

Názov a do istej miery aj mechanizmus výpočtového neurónu je historicky inšpirovaný organickým neurónom. Z množstva vstupných vlákien je výstupom jedna hodnota aktivácie.

V kontexte ML je neurónová sieť výpočtový graf zložený z diferencovateľných operácií. Základný neurón v našom význame je popísaný vzťahom:

$$a = \sigma(\mathbf{W} \cdot \mathbf{z} + b)$$

Kde σ je nelineárna aktivačná funkcia, z je vstupný vektor, a výstupná aktivácia, W, b - váhy a bias sú parametre siete, ktoré sú predmetom optimalizácie.

Táto najjednoduchšia forma je v rôznych adaptáciách prítomná v ďalších typoch vrstiev/buniek (layer/cell) ako napr.:

- spojená vrstva (dense layer)
- konvolučná vrstva
- rekuretná bunka
- transformer jednotka/bunka (unit/cell), bunka s attention mechanizmom

(Goodfellow, Bengio a Courville, [2016](#))

Za rapídny rozvoj neurónových sietí v poslednom období do veľkej miery stojí dobrá paralelizovateľnosť využívaných algoritmov spolu s rozvojom GPU a príslušného výpočtového softvéru. Prispieva aj pokrok vo výpočtovej technológii využívajúcej CPU.

Základným mechanizmom optimalizácie je stochastický pokles po gradiente (SGD). Stochastickosť spočíva v tom, že dáta vstupujú do výpočtu po dávkach (batch) v pseudonáhodnom poradí. Následne je algoritmom spätnej propagácie (backpropagation) vypočítaný komponent gradientu pre každý parameter siete (pre daný batch).

Tieto algoritmy boli následne v rámci vyvoja obohatené o rôzne mechanizmy, ktoré umožňujú rýchlejšiu konvergenciu.

Náčrt aplikácie výpočtového grafu (Forward) a výpočtu zmeny hodnôt parametrov (Backward) pre jednoduchú sieť pozostávajúcu z dvoch vrstiev:

Forward

$$\mathbf{a}^{[0]}$$

$$\mathbf{a}^{[1]} = \sigma^{[1]}(\mathbf{W}^{[1]} \cdot \mathbf{a}^{[0]} + \mathbf{b}^{[1]})$$

$$\mathbf{a}^{[2]} = \sigma^{[2]}(\mathbf{W}^{[2]} \cdot \mathbf{a}^{[1]} + \mathbf{b}^{[2]})$$

Backward

$$\delta \mathbf{W}^{[2]} = -\alpha \frac{\partial L}{\partial \mathbf{W}^{[2]}}$$

$$\delta \mathbf{b}^{[2]} = -\alpha \frac{\partial L}{\partial \mathbf{b}^{[2]}}$$

$$\delta \mathbf{W}^{[1]} = -\alpha \frac{\partial L}{\partial \mathbf{W}^{[1]}}$$

$$\delta \mathbf{b}^{[1]} = -\alpha \frac{\partial L}{\partial \mathbf{b}^{[1]}}$$

3.2 FCNN

Konceptuálne najjednoduchšia architektúra je tzv. plne spojená neurónová sieť (Fully Connected Neural Network). Pozostáva zo sekvenčne umiestnených vrstiev neurónov ako zložených operátorov:

$$\begin{aligned}\mathbf{a}^L &= \sigma^L(\mathbf{W}^L \cdot \mathbf{a}^{L-1} + \mathbf{b}^L) \\ \mathbf{a}^{L-1} &= \sigma^{L-1}(\mathbf{W}^{L-1} \cdot \mathbf{a}^{L-2} + \mathbf{b}^{L-1}) \\ &\dots \\ \mathbf{a}^1 &= \sigma^1(\mathbf{W}^1 \cdot \mathbf{z} + \mathbf{b}^1)\end{aligned}$$

kde σ je nelineárna aktivačná funkcia, L označuje index poslednej vrstvy, niekedy nazývanej aj output vrstva.

3.3 LSTM

Long Short-Term Memory (Hochreiter a Schmidhuber, [1997](#)) je o niečo komplikovanejšia výpočtová jednotka, niekedy nazývaná *bunka* (cell).

Vychádza z mechanizmu rekurentnej bunky. To znamená, že jednotlivé prvky sekvencie prechádzajú tým istým výpočtovým grafom, pričom sa aktualizuje tzv. *stav bunky* (cell state). Využívajú sa sady filtrov, ktorých váhy sú predmetom optimalizácie.

$$\begin{aligned}\mathbf{f} &= \sigma_g(\mathbf{U}_f \mathbf{z} + \mathbf{V}_f \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_f) \\ \mathbf{i} &= \sigma_g(\mathbf{U}_i \mathbf{z} + \mathbf{V}_i \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_i) \\ \mathbf{o} &= \sigma_g(\mathbf{U}_o \mathbf{z} + \mathbf{V}_o \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_o) \\ \hat{\mathbf{c}} &= \sigma_c(\mathbf{U}_c \mathbf{z} + \mathbf{V}_c \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_c) \\ \mathbf{c}_t &= \mathbf{f} \circ \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i} \circ \hat{\mathbf{c}} \\ \mathbf{a} = \mathbf{h}_t &= \mathbf{o} \circ \sigma_h(\mathbf{c}_t)\end{aligned}$$

kde f, i, o sú forget, input, output filtre (gates), $\hat{c}$ je prechodný krok výpočtu stavu bunky, c, h sú stav bunky a tzv. *skrytý stav* (hidden state), ktorý je po poslednom prvku sekvencie aj výstupom LSTM bunky.

3.4 Transformer

Transformer je najmladšia spomedzi porovnávaných architektúr. Pôvodne bola vyvinutá na predspracovanie obrazových dát (Vision Transformer) (Vaswani et al., 2023) (pôvodné vydanie r. 2017). Odvtedy sa však stala súčasťou množstva aplikácií spracovávajúcich rôzne formáty dát. Najznámejšia je pravdepodobne z oblasti veľkých jazykových modelov (LLM).

Pri náčrte výpočtu aktivácie Transformer jednotky sa opierame o formuláciu z Thickstun, 2021.

$$\begin{aligned}\alpha_{i,j}^{(h)} &= \text{softmax}_j \left((\mathbf{W}_{h,q}^T \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{W}_{h,k}^T \mathbf{x}_j)^{\frac{-1}{2}} \right) \\ \mathbf{u}'_i &= \sum_{h=1}^H \mathbf{W}_{c,h}^T \sum_{j=1}^n \alpha_{i,j}^{(h)} \mathbf{W}_{h,v}^T \mathbf{x}_j \\ \mathbf{u}_i &= \gamma_1 \frac{\mathbf{x}_i + \mathbf{u}'_i - \mu_{\mathbf{x}_i + \mathbf{u}'_i}}{\sigma_{\mathbf{x}_i + \mathbf{u}'_i}} + \beta_1 \\ \mathbf{z}'_i &= \mathbf{W}_2^T \text{ReLU}(\mathbf{W}_1^T \mathbf{u}_i) \\ \mathbf{z}_i &= \gamma_2 \frac{\mathbf{u}_i + \mathbf{z}'_i - \mu_{\mathbf{u}_i + \mathbf{z}'_i}}{\sigma_{\mathbf{u}_i + \mathbf{z}'_i}} + \beta_2\end{aligned}$$

Náčrt výpočtu Transformer bunky. $\mathbf{W}$, γ , β sú parametre siete, $\mathbf{x}$ označuje vstup, $\mathbf{u}'$, $\mathbf{u}$, $\mathbf{z}'$ prechodné výpočtové kroky a $\mathbf{z}$ je výsledná aktivácia jednotky. Hodnota funkcie softmax je počítaná po zložkách:

$$\text{softmax}(\xi) = \frac{\exp(\xi)}{\sum_{k=1}^n \exp(\xi_k)}$$

4 Dáta

V práci používame dataset pozostávajúci z veličín meraných na staniciach SHMÚ za obdobie tak, ako je uvedené v nasledujúcom zozname.

Stanice:

- Boľkovce
- Bratislava - letisko
- Dolný Hričov
- Hurbanovo
- Kamenica nad Cirochou
- Košice - letisko
- Sliač

Veličiny:

- Dátum a čas
- Teplota
- Relatívna vlhkosť
- Zrážky
- Tlak
- Tlak redukovaný na hladinu mora
- Rýchlosť vetra
- Smer vetra

Obdobie:

- 2000-01-01 00:00:00
- 2019-12-31 23:00:00

4.1 Predspracovanie

V prípravných krokoch sme vykonali kontrolu kvality a vhodnosti dát pre účely optimalizácie ML modelov.

Z pôvodného počtu 1 928 520 záznamov sme veľkú časť vylúčili pre neúplnosť. Spolu s tým sme pre účely zachovania kompaktných 48-hodinových intervalov odstránili aj záznamy, ktoré nemali vadu. V prípade budúcej zmeny veľkosti vstupného, či predpovedaného intervalu je možné zachovať väčší podiel dát.

Do výsledného datasetu sme prijali spolu 1 192 464 záznamov v celkovom počte 24 843 intervalov požadovanej dĺžky.

V záznamoch sme údaje o čase a dátume nahradili funkciami sínus s periódou rok, resp. deň. Jedná sa v prvom rade o vytvorenie spojitých veličín. Taktiež sa týmto krokom snažíme predchádzať overfittingu na konkrétne dátumy.

Taktiež sme nahradili veličinu smer vetra jej priemetmi (kosínus, sínus).

Aby sme mohli vhodne overiť kvalitu výsledkov optimalizácie, rozdelili sme celý dataset rovným dielom na dve množiny. Prvá, označovaná *training set* vstupuje do optimalizácie. Druhá, označovaná *validation set* slúži na vyhodnotenie. Rozdelenie sme vykonali na základe indexu v datasete. Z toho vyplýva že optimalizácia prebieha na dátach z iných staníc, ako na ktorých je vyhodnocovaná. Výnimkou je stanica Boľkovce, ktorá (ako v súbore prostredná) je približne rovným dielom rozdelená medzi obe množiny.

4.2 Kvalita dát

Na pomerne veľkom počte záznamov je uvedený smer vetra 990, čiže "nie je možné určiť". Vo väčšine prípadov išlo o slabý vietor (v priemere 1.36 m/s), kde by sme mohli problém obísť. V dostatočne veľkom počte prípadov sa však jedná o pomerne silný vietor (v maxime 11 m/s).

V ideálnom prípade by sme tieto dáta nepoužili na učenie neurónovej siete a použili vietor ako u a v zložky.

Týmto spôsobom by sme však prišli o ďalšiu značnú časť dát. Navyše, práve prípady náhlych zmien smeru vetra sú niečo, čo by sme chceli neurónové siete učiť predvídať.

Prešetrili sme možnosti interpolácie smeru vetra, avšak vo viacerých prípadoch boli intervaly neurčeného smeru pomerne dlhé. Stalo sa tak aj v prípade, že sme uvažovali iba záznamy, kde rýchlosť dosiahla aspoň 4 m/s.

Rozhodli sme sa pre riešenie, kde sme zachovali veličinu rýchlosť vetra v pôvodnej forme. Namiesto toho sme (pre spojitosť veličín) transformovali uhol smeru vetra na dve veličiny: kosínus, sínus uhla. Pre prípady neurčeného smeru vetra sme pre obe veličiny zadali pevnú hodnotu 0

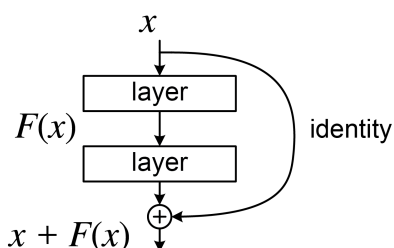
5 Experiment

5.1 Metódy

Predikciu sme robili sekvenčne na pôvodnom vstupe 24 záznamov (24 hodín). Neurónová sieť vykoná predpoveď ďalšieho časového kroku (+1 hodina) a následne použije 23 z pôvodných vstupov a 1 svoj výstup na predpoveď ďalšieho časového kroku.

Sieť takto vytvorí bodovú predpoveď na nasledujúcich 24 hodín.

Každú navrhnutú neurónovú sieť sme implementovali aj v konfigurácii, kde je jej úlohou počítať reziduum, respektíve inkrement voči poslednému záznamu zo vstupu. Tento princíp je dobre známy z iných optimalizačných úloh a osvedčil sa aj pri podobných úlohách riešených nerónovými sieťami.



By LunarLullaby - Own work

CC BY-SA 4.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=131458370>

Pred vstupom do procesu optimalizácie z dát training setu vypočítame štandardizačné konštanty priemeru a rozptylu. Do neurónových sietí vstupujú transformované dáta tak, aby platilo:

$$X \rightarrow Z; E[Z] = 0 \text{ \& } E[(Z - E[Z])^2] = 1$$

V snahe prevencie overfittingu sme využili štandardné metódy regularizácie. Prvou z nich je tzv. L2 regularizácia, tak ako je implementovaná v optimizéri AdamW (Loshchilov a Hutter, 2019).

Druhou je metóda tzv. *gradient clipping*, kde príliš veľký gradient môže zamedziť konvergencii siete, či až spôsobiť divergenciu celkového optimalizačného procesu.

Tretou metódou je tzv. *dropout*, ktorý sme pre všetky siete nastavili s $p = 0.3$. Dropout spočíva v položení 30% hodnôt na vstupe rovných 0. Tento krok núti sieť optimalizovať voči rôznym veličinám na vstupe približne vyvážene.

Porovnávali sme pomerne jednoduché varianty FCNN, LSTM a Transformer sietí. Počet parametrov jednotlivých sietí:

FFCN, FFCN Residual = 197258

LSTM, LSTM Residual = 205066

Transformer, Transformer Residual = 130604

Pri optimalizácii sme využili kompozitnú metriku vypočítanú ako vážený priemer MAE a MSE. Motiváciou bolo využiť vlastnosť MSE, ktorá silnejšie penalizuje veľké chyby a vlastnosť MAE, ktorej gradient je zachovaný aj pri menších chybách.

V rámci procesu sme variovali počet parametrov siete, ako aj koeficient rýchlosti učenia tak, aby sme predišli overfittingu a dostávali v reálnom čase čo možno najlepšie výsledky.

Vyhodnotenú ML modely prešli 100 cyklami optimalizácie na training sete. Implementácie boli v prostredí Python za využitia čo najmenšieho množstva bežných knižníc. Najvýznamnejšou je knižnica **torch**, ktorá dokáže využiť GPU a poskytuje objekty na prácu s neurónovými sieťami.

5.2 Výsledky

Ako metriku porovnania kvality ML modelov sme zvolili MAE, najmä kvôli jednoduchšej interpretovateľnosti. Metriku sme vyhodnocovali na všetkých výstupných veličinách sumárne a na teplote samostatne. Výsledky prezentujeme vo forme tabuľky a graficky na *Obr. 1*.

Dense : $MAE = 0.422$; $MAE_T = 0.338$

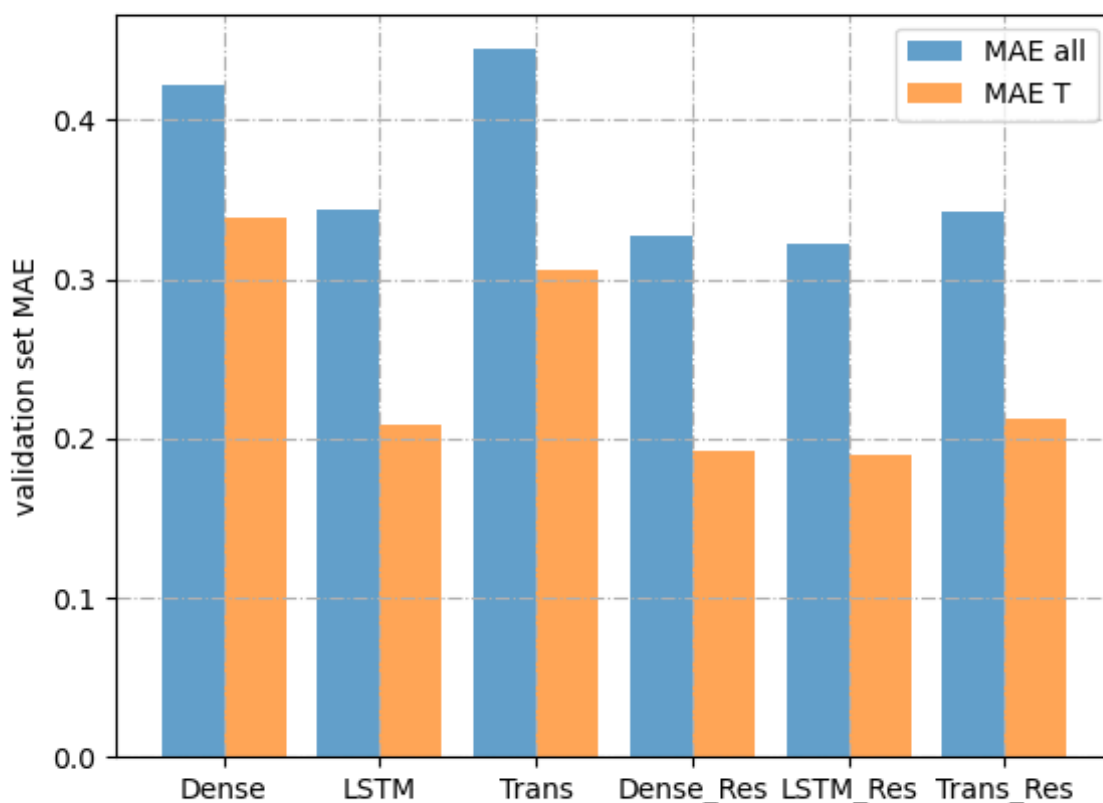
LSTM : $MAE = 0.344$; $MAE_T = 0.208$

Trans : $MAE = 0.444$; $MAE_T = 0.307$

Dense Res : $MAE = 0.328$; $MAE_T = 0.193$

LSTM Res : $MAE = 0.322$; $MAE_T = 0.189$

Trans Res : $MAE = 0.342$; $MAE_T = 0.212$

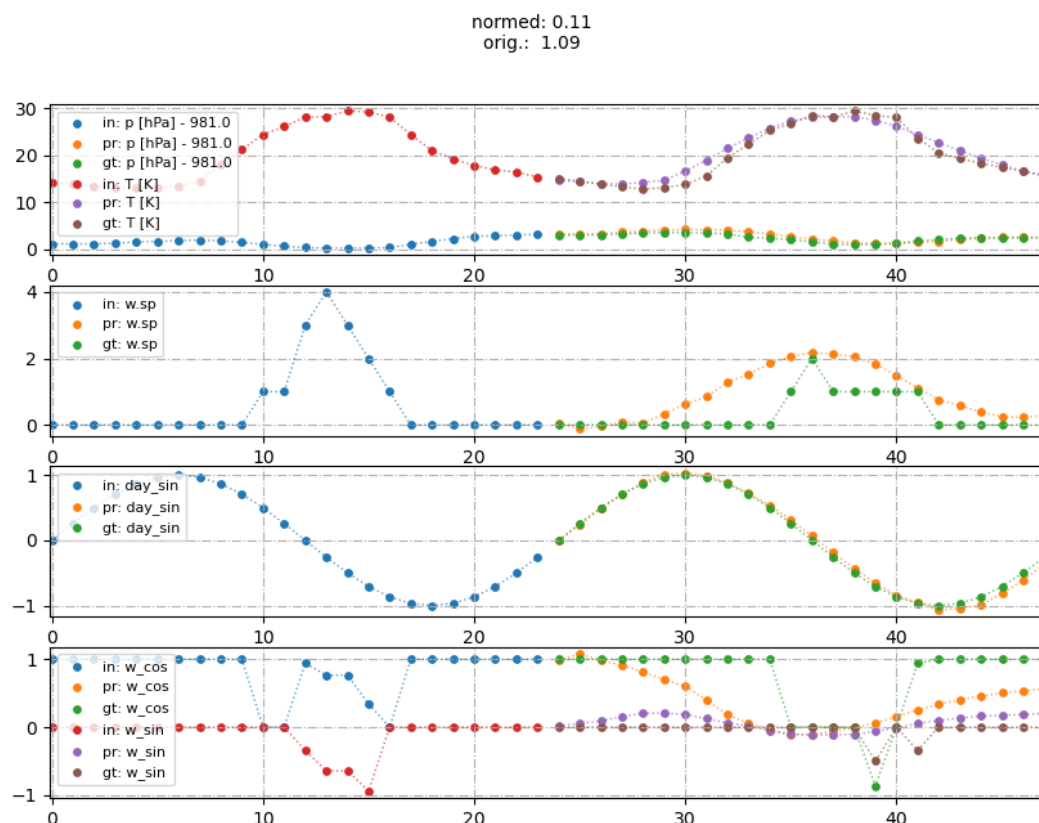


Obr. 1: Graf porovnania metriky MAE na validačnej množine
modrá - všetky veličiny, oranžová - iba teplota

Môžeme vidieť, že pre všetky porovnávané architektúry bola varianta s rezidúmi úspešnejšia. Najmenší rozdiel je medzi variantami LSTM. Architektúra Transformer bola v tomto prípade najmenej úspešná, čo môže byť spôsobené zvolenou variantou, konkrétne menším počtom parametrov.

Na demonštráciu kvality výstupu sme vybrali ukážku z výpočtu na validačnej množine najúspešnejšou sieťou LSTM Residual na Obr. 2. Ako referenčný bod kvality fitu sme uviedli aj fit sínusu s periódou deň. Môžeme vidieť, že pre túto veličinu je výstup pomerne presný.

Pomerne dobrý výsledok ponúkla sieť aj pre veličiny teploty a tlaku, hlavne pri krátkodobej predpovedi (do 4-6 hodín), avšak pre smer a rýchlosť vetra je presnosť menej uspokojivá. Podobná tendencia je aj pri výstupoch ostatných porovnávaných sietí.



Obr. 2: Ukážka inferencie LSTM Res siete po 100 cykloch optimalizácie.

6 Diskusia a záver

Implementovali, porovnali, a preskúmali sme limitácie rôznych, výpočtovo pomerne nenáročných neurónových sietí. Dosiahli sme uspokojivý odhad pre analytickú funkciu a pomerne uspokojivú kvalitu krátkodobej predpovede pre niektoré veličiny, ako teplota a tlak. Pre iné veličiny, ako rýchlosť a smer vetra bola predpoveď porovnateľne horšia.

Pri našom experimente sme neurónovým sieťam neposkytovali žiadne iné údaje, ako samotné záznamy. Jediná sprostredkovaná informácia o nadmorskej výške bola cez veličinu MSLP.

Dáta pochádzajú z pomerne malého množstva staníc, ktoré sa nachádzajú na pomerne malej oblasti. Taktiež neboli zahrnuté žiadne informácie o stave okolia.

Predmetom ďalšieho bádanie bude napríklad kombinovanie bodových meraní s predpoveďami NWP modelov. Veríme, že tieto údaje by mohli byť nápomocné pri snahe odhadovať smer a rýchlosť vetra aj na lokálnej škále.

7 Literatúra

- [1] A. L. Samuel. “Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers”. In: *IBM Journal of Research and Development* 3.3 (1959), s. 210–229. DOI: [10.1147/rd.33.0210](https://doi.org/10.1147/rd.33.0210).
- [2] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio a Aaron Courville. *Deep Learning*. <http://www.deeplearningbook.org>. MIT Press, 2016.
- [3] Ashish Vaswani et al. *Attention Is All You Need*. 2023. arXiv: [1706.03762 \[cs.CL\]](https://arxiv.org/abs/1706.03762), URL: <https://arxiv.org/abs/1706.03762>.
- [4] Remi Lam et al. *GraphCast: Learning skillful medium-range global weather forecasting*. 2023. arXiv: [2212.12794 \[cs.LG\]](https://arxiv.org/abs/2212.12794), URL: <https://arxiv.org/abs/2212.12794>.
- [5] Jaideep Pathak et al. *FourCastNet: A Global Data-driven High-resolution Weather Model using Adaptive Fourier Neural Operators*. 2022. arXiv: [2202.11214 \[physics.ao-ph\]](https://arxiv.org/abs/2202.11214), URL: <https://arxiv.org/abs/2202.11214>.
- [6] Yunbo Wang et al. “PredRNN: Recurrent Neural Networks for Predictive Learning using Spatiotemporal LSTMs”. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. Ed. I. Guyon et al. Zv. 30. Curran Associates, Inc., 2017. URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/e5f6ad6ce374177eef023bf5d0c018b6-Paper.pdf.
- [7] Ajitabh Kumar. *Skilful Precipitation Nowcasting Using NowcastNet*. 2023. arXiv: [2311.17961 \[physics.ao-ph\]](https://arxiv.org/abs/2311.17961), URL: <https://arxiv.org/abs/2311.17961>.
- [8] Sebastian Lerch a Kai L. Polsterer. *Convolutional autoencoders for spatially-informed ensemble post-processing*. 2022. arXiv: [2204.05102 \[cs.LG\]](https://arxiv.org/abs/2204.05102), URL: <https://arxiv.org/abs/2204.05102>.
- [9] Sepp Hochreiter a Jürgen Schmidhuber. “Long Short-term Memory”. In: *Neural computation* 9 (dec. 1997), s. 1735–80. DOI: [10.1162/neco.1997.9.8.1735](https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735).
- [10] John Thickstun. “Transformers and Maximum Likelihood Speech Models”. In: (2021). URL: <https://johnthickstun.com/docs/ttransformers.pdf>.
- [11] Ilya Loshchilov a Frank Hutter. *Decoupled Weight Decay Regularization*. 2019. arXiv: [1711.05101 \[cs.LG\]](https://arxiv.org/abs/1711.05101), URL: <https://arxiv.org/abs/1711.05101>.