

Bc. Marcel Vasilák,

Ústav geografie, Prírodovedecká fakulta,  
Univerzita P.J.Šafaříka v Košiciach

# Vývoj a priestorová diferenciácia snehovej pokrývky v oblasti Vysokých a Belianskych Tatier v kontexte klimatickej zmeny

## 1. Úvod

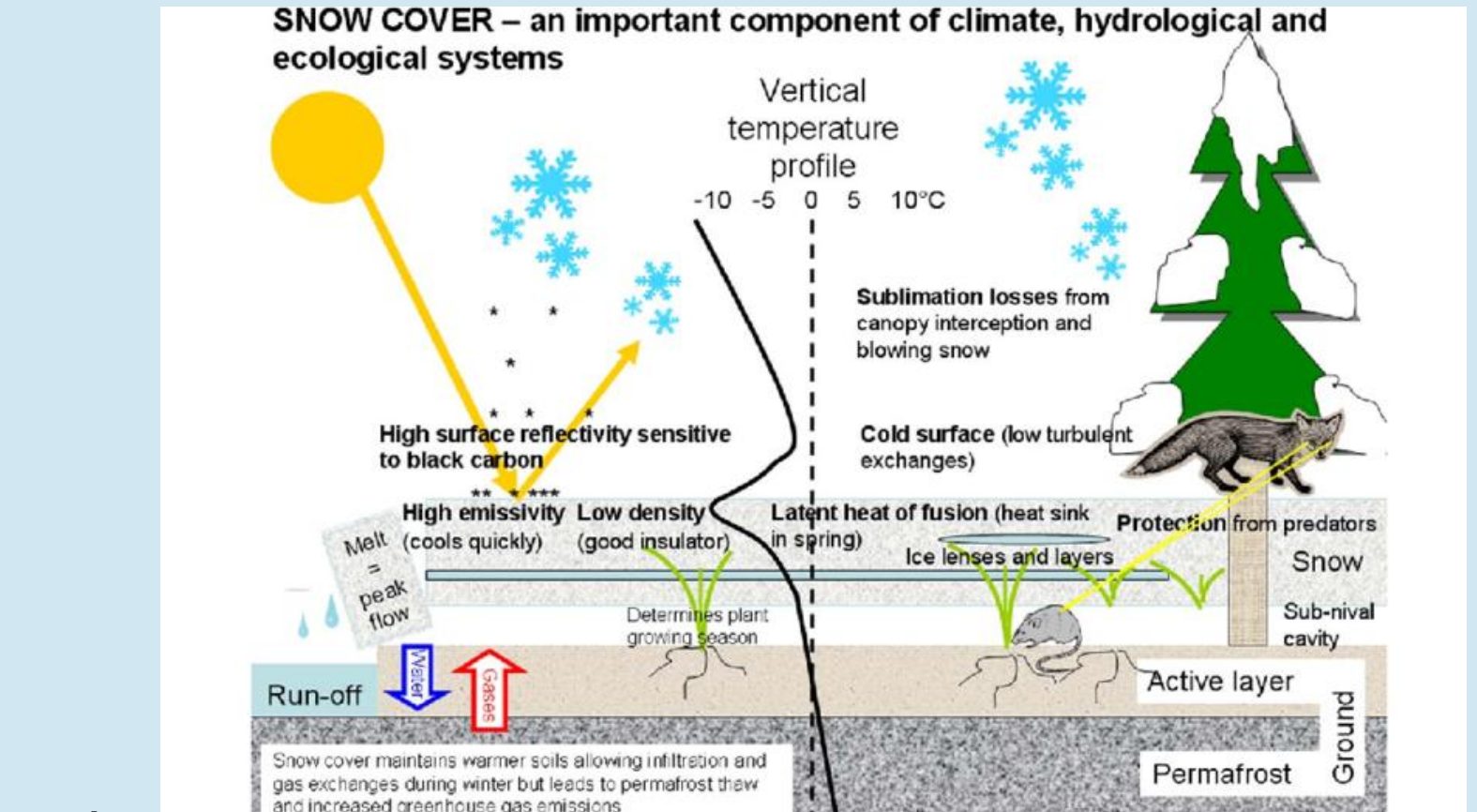
Tatry predstavujú unikátny horský komplex so špecifickou biosférou, klimatickými, hydrologickými a geomorfologickými procesmi, ktoré sa navzájom ovplyvňujú.

## Význam snehu a snehovej pokrývky v krajine

- sneh ako činiteľ modelácie reliéfu**- nivácia, nivačné obrusovanie, nivoačno-gravitáčnne procesy (snehové lavíny, nivačné valy), nivačno-eolické procesy
- sneh ako zásobárňa a zdroj vody**- vplyv na hydrologickú bilanciu krajiny, zadržovanie množstva vody v zime, vplyv úbytku snehovej pokrývky (SP)
- sneh ako izolátor a regulátor pôdneho ekosystému**- interakcia s atmosférou aj pedosférou- alebo snečného žiarenia, regulátor pôdnej vlhkosti a teploty (izolácia)- ochrana pôdneho edafónu v zime

**Lavíny**- modelačný činiteľ reliéfu aj rozloženia SP- lavínové dráhy (1/6 územia, max. 1700-1900 m n.n.m.); vplyv sklonu, nadmorskej výšky, orientácie svahov, lokálnej orografie aj klimatických faktorov

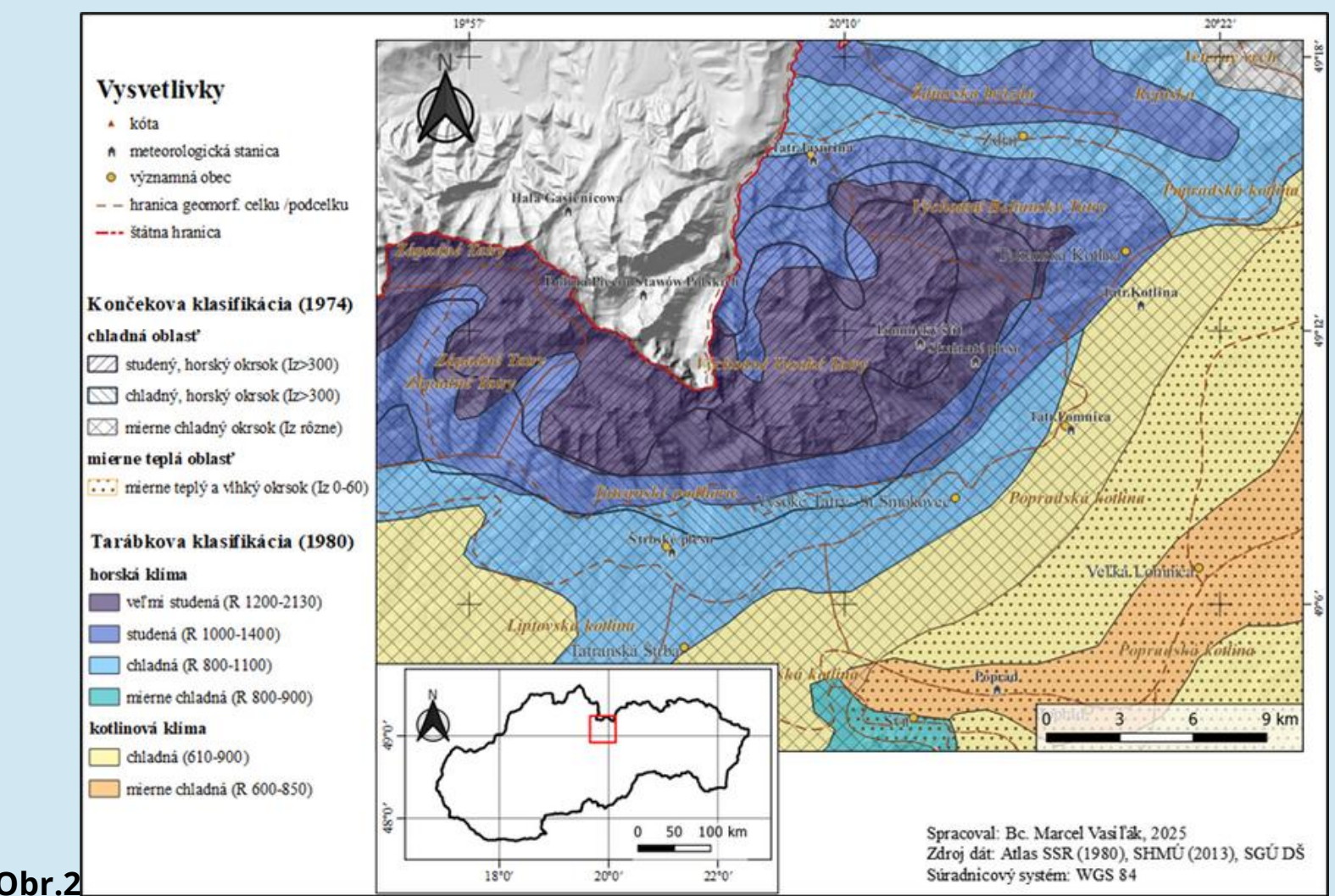
- dôležitý je monitoring lavínového nebezpečenstva (st. 1-5)



Obr.1 Sneh a snehová pokrývka v krajine ako činiteľ ovplyvňujúci lokálnu klímu, hydrologický režim a biosféru; Zdroj: Callaghan T.V. et al. (2011)

## Tatry v slovenských klimatických klasifikáciách

- Klimaticko-geografické typy podľa K.Tarábka (1980)
- Klimatická klasifikácia podľa M.Končeka (1974)



Obr.2 Oblasť Vysokých a Belianskych Tatier v klimatickej klasifikácii podľa Končeka (1974) a klimaticko-geografickej klasifikácii podľa Tarábka (1980); Zdroj: Vasilák (2025)

## WRF (Weather Research and Forecasting)

- základný nástroj na historické klimatické simulácie aj predpovede
- možné obmedzenia v parametrizácii modelu povrchu Noah-LSM
- pravdepodobné nadhodnocovanie SP, zvlášť na konci zimy a na jar

## ERA5

- reanalýza globálnej klímy v rámci programu Copernicus (ECMWF)
- pozorovaní, procesom dátovej asimilácie od r.1940
- relatívne nízke rozlíšenie 31 km (0,25°), spoľahlivý zdroj dát

## Downscaling

- cieľom výrazné zlepšenie rozlíšenia pôvodných (vst./výst.) dát modelu- zachytenie lokálnych klimatických javov (spätých s reliéfom) malého rozsahu
- statický a dynamický downscaling

## Meteorologické prvky v primárnom spracovaní

- výška SP**- mesačná/ročná/sezónna priemerná a max.ročná výška SP
- trvanie SP**- počet dní so SP, obdobie so SP, prvý a posledný výskyt SP (PL)
- zrážky**- úhrn ročných aj zimných zrážok, počet dní so snežením/zrážkami, podiel snehových zrážok na celkovom zimnom úhrne, vplyv NAO na zrážky
- teplota**- priemerná ročná a mesačná teplota vzduchu
- snečný svit**- mesačné trvanie snečného svitu

## Významné faktory priestorovej distribúcie SP

- teplota vzduchu**- regulátor všetkých procesov (zrážky, topenie)
- orografické pomery**- lokálne orografické prúdenie, orografická oblačnosť- zdroj lokálnych zrážok, orografické bariéry a členitosť reliéfu
- viator**- erózia (vyvíevanie), transport a akumulácia SP (na záveterných stranách, za bariérami), sneh zadržaný vegetáciou aj lesným porastom (súvis s vodnou hodnotou SP SWE)
- makroregionálne mechanizmy atmosférickej cirkulácie** a rozloženie tlakových útvarov v atmosfére- obmedzený vplyv
- nadmorská výška**- súvisí s teplotou, teplotný gradient, súvis so snečným žiarením

## 2. Ciele práce

- klimatické spracovanie snehových pomerov v oblasti Vysokých a Belianskych Tatier, s porovnaním s dátami staníc z poľských Tatier (vzhľadom na orografické rozdiely)
- analýza vývojových trendov parametrov SP (významnosti, korelácie, variability), aj v kontexte klimatickej zmeny
- popísať s určitou presnosťou diferenciaciu SP v horstve, vzhľadom na lokálne orografické, geomorfologické a klimatické špecifiká
- popísať spoľahlivosť WRF modelu (založenom na dátach z ERA5) porovnaním s nameranými hodnotami na stanicách

## 3. Záujmové územie

- územie Vysokých a Belianskych Tatier a tatranské predhorie+ poľské Tatry a predhorie (obr.1)- sekundárne- lepší obraz o snehových pomeroch pohoria)
- pozemné dáta z 10 meteorologických staníc SHMÚ (SK) a IMGW (PL), v Tab...

poradie	názov stanice	skrátene označenie	geografické súradnice			nadmorská výška (m n.n.m.)			
			st.	min.	sek.				
1.	Štrbské pleso	ŠTP	49	7	10	20	3	48	1322
2.	(Tatranská) Javorina	TJ	49	15	47	20	8	37	1013
3.	Lomnický štít	LŠ	49	11	43	20	12	54	2635
4.	Skalná pleso	SKP	49	11	22	20	14	9	1778
5.	Tatranská Lomnica	TL	49	9	52	20	17	17	827
6.	Tatranská Kottlina	TK	49	12	36	20	19	35	803
7.	Tatranská Polianka	TP	49	7	19	20	11	15	975
8.	Bukovina Tatranská (PL)	BT	49	20	15	20	5	54	908
9.	Hala Gąsienicowa (PL)	HG	49	14	39	20	0	21	1526
10.	Dolina pięciu stawów (PL)	DPS	49	12	49	20	2	52	1685

Tab.1 Skúmané meteorologické stanice v záujmovom území (SK a PL); Zdroj: SHMÚ, HYDRO IMGW-PIB a KLIMAT IMGW-PIB (2024)

## 3. Metodika práce

### Zdroje dát

Primárne dáta na klimatologické spracovanie sme získavali za obdobie **1981-2023** (SK), **1991-2023** (obmedzenia r. 1991 DPS, HG len do 2018), z nasl. zdrojov:

- SHMÚ - Národný klimatický program** (zv. NKP SR 14/19, NKP SR 15/20)- obdobie 1981-2010, dáta na požiadanie (spracovanie v BP, DP)- obdobie 2011-2023
- IMGW** (Inštitút meteorológie a vodného hospodárstva v Poľsku) - verejne dostupné dáta za obdobie **1991-2023** (DPS prevažne od 1992; HG do 2018)\*

Sekundárne (potvrdzujúce) dáta do modelu WRF - denné dáta z reanalýzy ERA5 (formát .grib, single-pressure levels, čas 12:00)- získané z klimatickej databázy programu Copernicus (v rámci ECMWF), prostredníctvom GIS softvéru.

### Metodika klimatologického spracovania

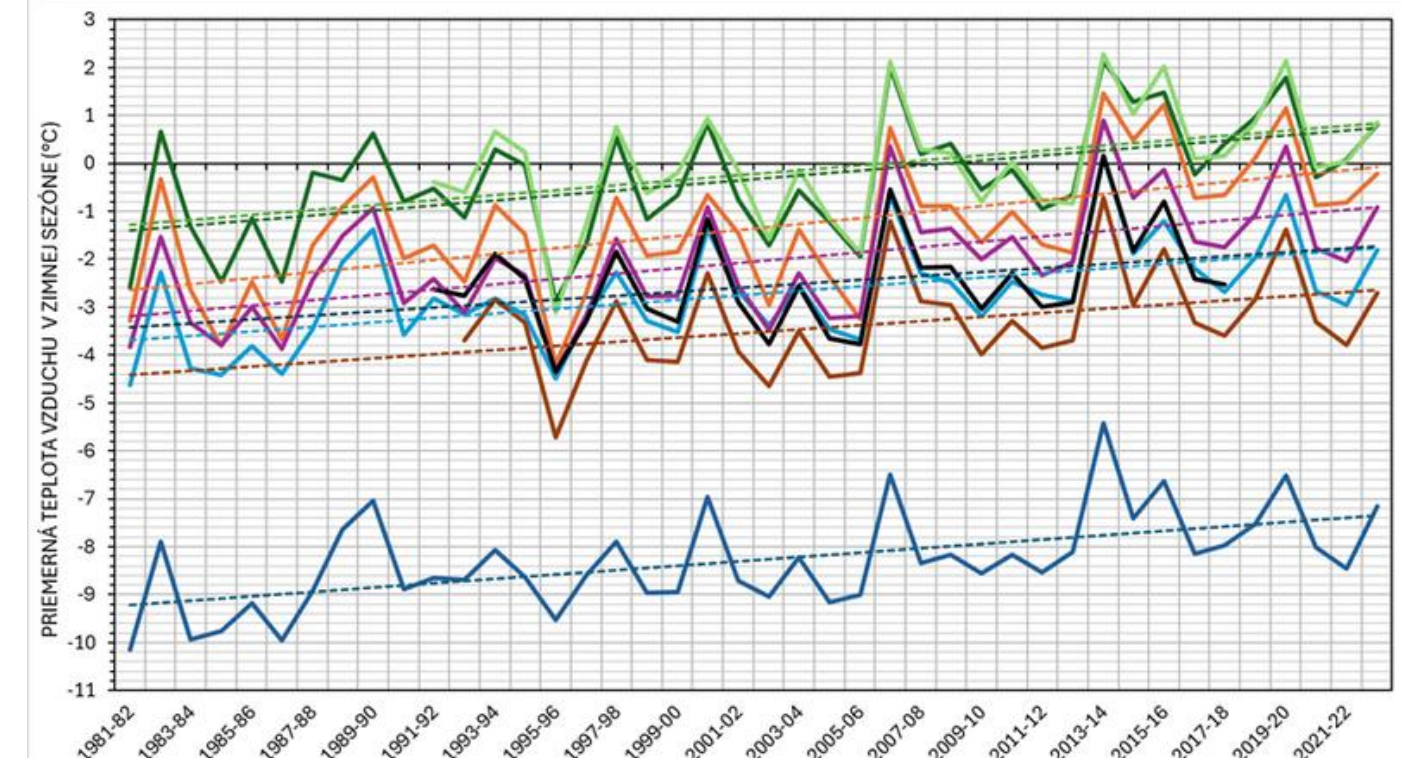
Primárne dáta sme tabulkovo a graficky spracovávali- 3 referenčné obdobia: rok (I.-XII.), sezónny rok (VIII.-VII. nasl.roku)- sezónny vývoj, zimná sezóna (XI.-IV. nasl.roku)- popis a vývoj iba v zimnom období)

- významnou časťou štatistické spracovanie- závislosti (Pearsonov korel.koeficient, smer.odch. (SO), variačný koeficient (VK a rozptyl), špeciálne trendy (štat.významnosť (ŠV) cez regresný F-test, t-test, variabilita cez VK, koef.determinancie, SO reziduí)

Pre sekundárne dáta (po ich stiahnutí) sme definovali vhodnú hlavnú aj rodičovskú (nesting) doménu na zjemnenie rozlíšenia dát ERA5 (dynamický downscaling), konfigurácia nastavení výpočtu WRF (prieběžný zápis), preprocessing a výpočet modelu WRF

**Budúce spracovanie**: postprocessing (spracovanie výstupných dát simulácií formátu netCDF, interpolácia dát, rastrové mapové výstupy výšky SP, extrahovanie bodových výšok SP z mapy pre porovnanie so stanicami)

## Teplota vzduchu

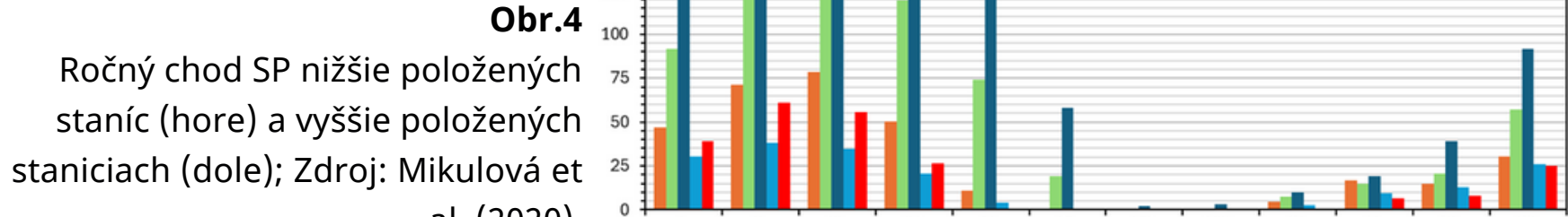


Obr.3 Časové rady priemernej teploty vzduchu v ZS 1981/1982-2022/2023 pre vybr.stanice; Zdroj: Mikulová et al. (2019), SHMÚ

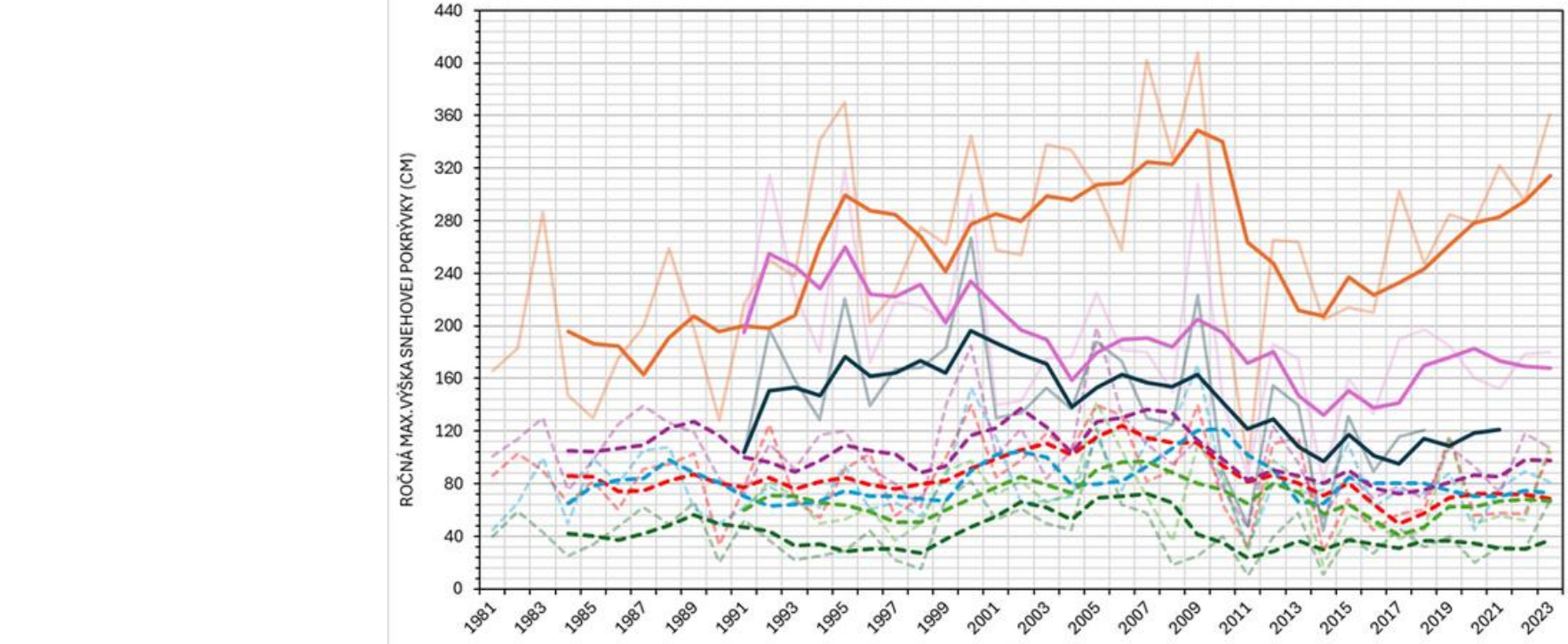
- prudký **nárast teploty** vzduchu ročne aj v ZS (0,41- 0,63°C /dekádu)
- vyšoká medziročná **variabilita** atakujúca SP- pravdepodobná príčina mechanizmy atmosférickej cirkulácie (NAO a iné)
- teplotný gradient** max. na jar, min. v zime (0,26°C /100 m)- vlhký vzduch, inverzie

## Priemerná a maximálna výška SP

- výsledok pôsobenia cykl./anticykl. situácií, prevažne z Z-SZ prúdenia, otáznny vplyv NAO a iných cirkulácií
- rôzny pokles ročnej výšky SP (PL st.)- (-0,4) až (-6,7) cm
- vyšoká variabilita (SOR 10,1-19, max. DPS)
- faktor návetria/závetria, orografickej oblačnosti, nadm.výšky
- vplyv lokálnych vetrov a vegetácie
- súvis so zmenou zimných úhrnov



Obr.4 Rožny chod SP nižšie položených staníc (hore) a vyššie položených staniciach (dole); Zdroj: Mikulová et al. (2020), SHMÚ,IMGW-PIB (2024)



Obr.5 Časové rady maximálnej SP za roky 1981-2023 (SK), 1991-2023\* (PL); Zdroj: Mikulová et al. (2020), SHMÚ,IMGW-PIB (2024)

- pozitívne ŠV trendy vo vysokých polohách - súvis s celkovým nárastom zimného úhrnu aj priemerného denného maxima zrážok (za 1981-2010) - variabilita súvisí s medziročnými rozdielmi v zrážkach, atmosférickom prúdení...
- orientácia svahu a nadm.výška ovplyvňuje obdobie maxima aj max.výšku SP
- v ročnom chode maximá v neskoršej zime (vrchol akumulácie SP pred topením)

## Korelácia teploty vzduchu a charakteristík SP

	stanica	príemerná výška SP	ročný počet dní so SP	ročná max.výška SP	úhrn snehových zrážok	počet dní so snežením	pomer ročného počtu dní so snežením a so zrážkami
priemerná ročná teplota vzduchu	BT	-0,22	-0,50	-0,13	0,12	-0,44	-0,50
	HG	-0,11	-0,43	-0,23	0,19	-0,59	-0,44
	DPS	0,07	-0,38	-0,21	0,30	-0,40	-0,51
	LŠ		-0,36	0,27			
	SKP		-0,02	0,03			
	ŠTP		-0,31	-0,14			
	TJ		-0,64	-0,24			

Tab.2 Korelačná tabuľka priemernej roč.teploty a roč.parametrov SP (červené ŠV závislosti); Zdroj: Mikulová et al. (2019 a 2020), SHMÚ,IMGW-PIB (2024)

- zväčša **stredne silná alebo silná závislosť** potvrdená medzi roč.teplotou vzduchu a roč.počtom dní so SP, roč.počtom dní so snežením a roč.podielom dní so snežením ku dňom s celkovými zrážkami, súvis korelácie s orientáciou lokality otázky
- významná závislosť medzi **nadmorskou výškou so všetkými parametrami SP**

## 4b. Očakávané výsledky spracovania sekundárnych dát

- mapa priestorovej distribúcie SP v upravenom rozlíšení rádovo desiatok-stoviek metrov (po dynamickom downscalingu a interpolácii výstupných dát)
- priestorová diferenciácia SP závislá od nadmorskej výšky, orografických pomerov a prúdenia alebo lesnej pokrývky (pod hranicou lesa)
- lokálny popis akumulácie SP v rámci pohoria - s rozlíšením dolín, hrebeňov alebo väčších plies.
- vývoj priestorovej diferenciacie SP za simulované obdobie 1991-2000
- verifikácia výšky SP zo simulácií WRF pozemnými meraniami - porovnanie výkonu WRF s nameranými dátami, zhodnotenie jeho presnosti a odchýlok

## 5. Záver

- trendy charakteristík SP sú rozdielne, s negatívnym dopadom vzrastajúcej teploty, v mnohých formách (nárast zimných úhrnov, pokles podielu snehových zrážok, intenzívnejšie jarné topenie snehu...)
- rozdielna diferenciacia charakteristík SP podľa nadmorskej výšky, u niektorých prekvapivý vývoj, väčšinou zreteľný dopad klimatickej zmeny v úbytku SP
- medziročná variabilita všetkých parametrov SP v dôsledku premenlivého charakteru počasia v strednej Európe a mechanizmov atmosférickej cirkulácie
- priestorová diferenciacia silno závislá od nadmorskej výšky, ale aj orientácie svahov, lokálnych orografických špecifik a prúdení či vegetácie
- porovnanie presnosti modelu WRF (na vstupných dátach z ERA5) voči pozemným staničným meraniam
- viacero praktických aplikácií a vied vychádzajúcich z aktuálnych zákonitostí vývoja a rozloženia SP - cestovný ruch, vodohospodárstvo, monitoring lavínového terénu, život tatranských ekosystémov
- obmedzenie interpretácie niektorých výsledkov v dôsledku nedostatku dlhodobých dát zo SK Tatier
- perspektíva rozvoja výskumu - homogenizácia dlhodobých časových trendov, odhad priestorovej a výškovej distribúcie a SWE v Tatrach

## Zdroje literatúry

BOHUŠ, I. et al., 1974: Klíma Tatier. Bratislava (Veda, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied)

STÉIROU, E. et al., 2017: Links between large-scale circulation patterns and streamflow in Central Europe: A review. In Journal of Hydrology, 549, pp. 484-500

URBAN, G. et al., 2023: Reasons for shortening snow cover duration in the Western Sudetes in light of global climate change. In International Journal of Climatology, 43(12), pp. 5485-5511

VARGA A.J., BREUER H., 2023: Evaluation of snow depth from multiple observation-based, reanalysis, and regional climate model datasets over a low-altitude Central European region. In Theoretical and Applied Climatology, 153, pp. 1393-1409

MIKULOVÁ, K. et al., 2019: Klimatické normály za obdobie 1981-2010 na Slovensku. In Národný klimatický program SR (NKP 14/19). Bratislava (SHMÚ)

MIKULOVÁ, K. et al., 2020: Klimatické normály atmosférických zrážok 1981-2010 na Slovensku. In Národný klimatický program SR (NKP 15/20). Bratislava (SHMÚ)

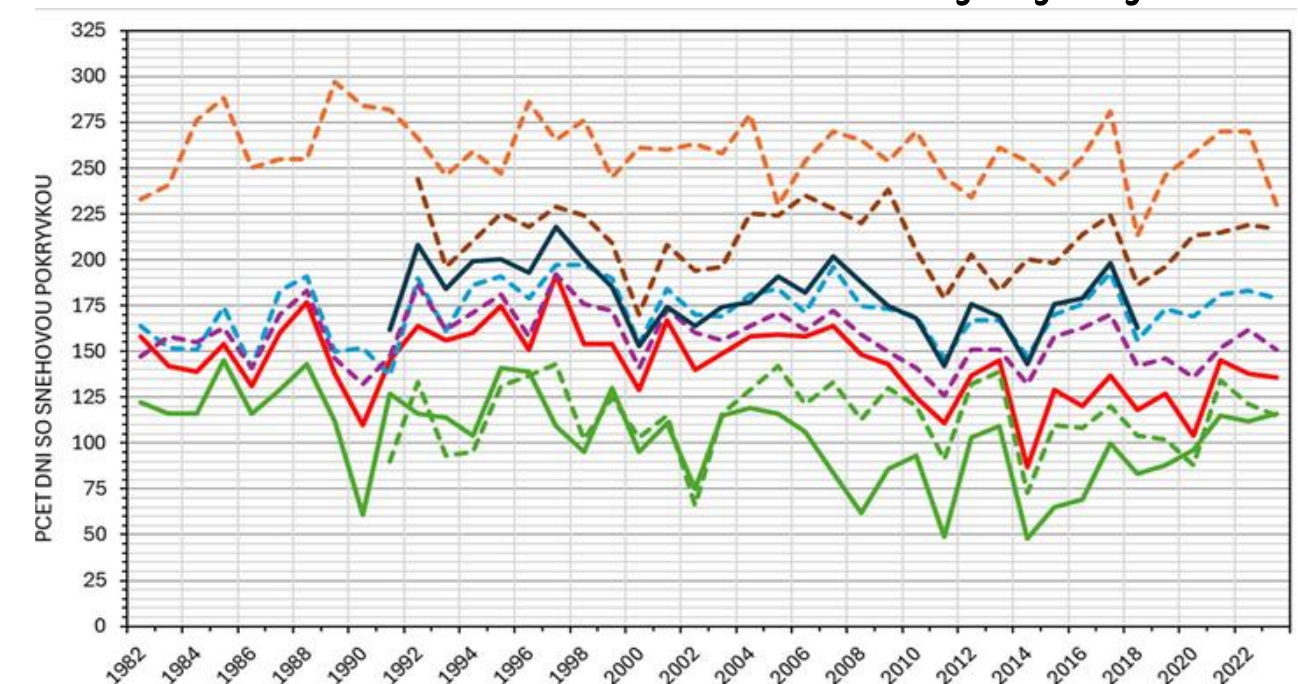
KLIMAT IMGW-PIB, 2024: Metadane stacji pomiarowych [online]. Dostupné na <https://klimat.imgw.pl/pl/meta-dane/>

MATIU, M. et al., 2021: Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. In The Cryosphere, 15(3), pp. 1343-1382

VARGA A.J., BREUER H., 2023: Evaluation of snow depth from multiple observation-based reanalysis, and regional climate model datasets over a low-altitude Central European region. In Theoretical and Applied Climatology, 153, pp. 1393-1409 ...

## 4a. Výsledky spracovania primárnych dát

### Trvanie a časový výskyt SP

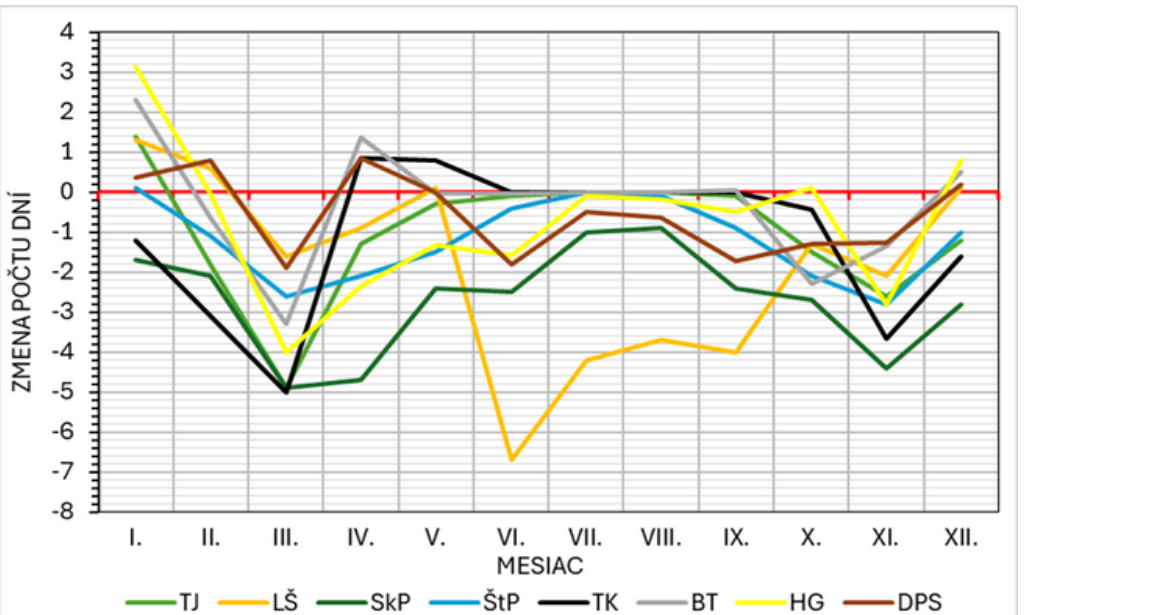


Obr.6 Časové rady počtu dní so SP v ZS 1981/1982-2022/2023 pre vybr.stanice; Zdroj: Mikulová et al. (2019), SHMÚ

- zväčša **ne-ŠV poklesové trendy** (okrem SkP), -8,2 až -10,7 dňa /10r. (ŠV), pomalšie vysoké polohy (oteplovanie)
- trvanie **silne diferencované** podľa nadmorskej výšky a expozície svahov (insolácia, efekt zrážkového tieňa, prúdenie vlhkého vzduchu)
- medziročná variabilita spôsobená parciálne **cirkuláciou atmosféry** (NAO) a celkovým počasím (vyššie VK a SOR min. , nižšie VK>20%, SOR nad 20)
- sekundárny vplyv **sln. svitu a radiácie** (pozitívne trendy v 1981-2010)
- výrazné **rozdiely medzi náveternou a záveternou stranou**- nižšie polohy bez záruky zimného snehu, vyššie posunuté maximum
- malá vzorka staníc na všeobecné závery o prvom/poslednom dni výskytu SP
- pravdepodobné trendy v posune prvého (posledného) dňa so SP na neskor (skôr), ako aj skracovanie obdobia so SP -možná rozdiely podľa nadm. Výšky a orientácie stanice
- v nižších polohách priemerné obdobie SP od zač. XI.- prelom III./IV.

## Sneženie a zimné zrážky

- počty dní so snežením v **výraznom poklese**, (viac daždivých dní)
- extrémnejší vývoj v III. a XI., orografická oblačnosť (prúdenie zo SZ)



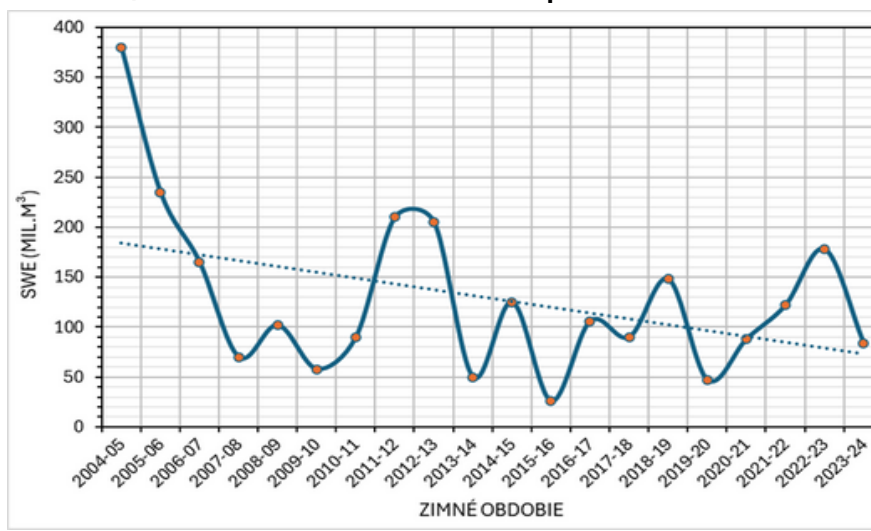
Obr.7 Zmena priemernej počtu dní so snežením medzi 1981-2010 a 2014-2023 (SK), 1991-2010\* a 2014-2023 (HG 2009-2018\*) (PL); Zdroj: IMGW-PIB (2024)

- podiel snehových zrážok **klesajúci** (neŠV) na BT (-2,4%), DPS a HG klesajúce min./stagnácia, s vysokou variabilitou (SOR 6,2-12,2, max.BT)
- rast celkových i snehových zrážok (pomalšie), zvlášť LŠ a iné vyššie položené st.
- vplyv NAO na zimné zrážky slabý (reliéf, hranica pozit. a negat. korelácie NAO a zrážok)

Obr.8 Vývoj podielu snehových zrážok na celkovom úhrne za ZS 1991/1992-2023-2024\*; Zdroj: IMGW-PIB (2024)

## Vybrané aplikácie výstupov práce

- turistický management**- úbytok SP mení podmienky zimného CR
- lavínový monitoring**- zmena pomerov SP → zmena početnosti lavín
- hydrologický režim oblasti**- všeobecný úbytok vodnej hodnoty SWE akumulovanej v snehu (menšia SP)- suchá, nárazové topenie, zmena odtokového režimu riek, maximum SWE (II.-IV.)



Obr.9 Priebieh ročných maxim SWE v ZS 2004/2005-2023/2024 pre povodie Popradu; Zdroj: SHMÚ