

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie



Bakalářská práce

GENEZE ODTOKU V ALPÍNSKÉM POVODÍ

RUNOFF GENESIS IN AN ALPINE CATCHMENT

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Kateřina Dušková

Doc. Ing. Josef Křeček, CSc.

2021



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Dušková Jméno: Kalčína Osobní číslo: 477233

Zadávatel katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie

Studijní program: (R3651) Stavební inženýrství

Studijní obor: (364/R015) Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Geneze odtoku v alpínském povodí

Název bakalářské práce anglicky: Runoff genesis in an alpine catchment

Pokyny pro vypracování:

Tato studie by měla zahrnovat:

- Analýzu dostupných klimatických a hydrologických pozorování v alpínské oblasti Vysokých Tater,
- Odhad hodnot potenciální a aktuální evapotranspirace,
- Posouzení vodní bilance a tvorby odtoku,
- Zhodnocení vlivu stavu povodí a dosavadní změny klimatu na odtok

Seznam doporučené literatury:

Kemel, M. (2000). Klimatologie, meteorologie, hydrologie. Skripta ČVUT.

De Jong, C., Collins, D., Ranzi, R. (2005) Climate and hydrology in mountain areas. John Wiley & Sons, Ltd


Shaw, E.M. (2011): Hydrology in practice. 4th edition, Span Press, London.


IPCC (2013). Climate change 2013: The physical science basis. The 5th assessment report, WMO, Geneva.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Doc. Ing. Josef Křeček, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 30.12.2020 Termín odevzdání bakalářské práce: 16.5.2021

(Účej uvedte v souladu s datem v časové příručce přídatelného ek. roku)


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovávat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

5.1.2021

Datum převzetí zadání

Dušková

Podpis studenta(ky)

Poděkování

Ráda bych poděkovala Doc. Ing. Josefu Křečkovi, CSc za vedení a pomoc při zpracovávání této práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Ladislavu Palánovi, Ph.D. za rady ohledně programu Landsat. Za poskytnutá data patří mé díky Prof. Evženu Stuchlíkovi, CSc. z Hydrobiologického ústavu ČSAV

Na závěr bych chtěla poděkovat své rodině za zázemí, které mi poskytli při tvorbě této práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Geneze odtoku v alpínském povodí“ vypracovala samostatně a veškeré použité informační zdroje jsem uvedla v seznamu použité literatury podle zásad metodického pokynu č. 1/2009 ČVUT, O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze 14.5.2021

Dušková Kateřina

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá genezí odtoku z povodí alpínského typu ve Vysokých Tatrách, v závislosti na klimatických změnách. V práci je analyzována změna teploty, srážek, evapotranspirace, vodní bilance povodí a jezera, odtoková výška, změna pokrytí vegetací a půdní vlhkost. Z výsledků je patrná změna sezonního rozložení srážek, mírné oteplení, zvýšení výparu a pokles vodních bilancí. Vyrůstá hustota pokrytí vegetací, ale hodnoty půdní vlhkosti zůstávají konstantní.

Hlavními příčinami změny geneze odtoku, vzhledem ke klimatickým změnám, jsou změny v rozložení srážkových úhrnů a nárůst teploty vzduchu. Dochází tak k dřívějšímu odtoku vody z povodí v rámci ročního cyklu.

Klíčová slova:

Geneze odtoku, alpínské povodí, klimatická změna, evapotranspirace, vodní bilance.

Annotation

The aim of this thesis is to evaluate changes in the runoff genesis of an alpine catchment in The High Tatra Mountains related to the global climate change. In this study, hydrological impacts of climate changes concerned on characteristics of the air temperature, precipitation, evapotranspiration, water balance of both catchment and lake, density of the vegetation cover, and soil moisture. Evidently, the density of vegetation cover is growing; however, soil moisture values are constant. Main reasons of analysed changes in the runoff genesis are due to the global climate change (shifts in the seasonal distribution of precipitation sums and rising air temperatures). Consequences are visible in an earlier runoff within a year.

Main reason of runoff genesis, due to climate change, is change of distribution precipitation and temperature rise. Consequence of this process is earlier runoff from catchment.

Key words:

Runoff genesis, alpine catchment, climate change, evapotranspiration, water budget

Obsah

1	Úvod a cíle	7
1.1	Povodí alpínského typu	7
1.2	Význam pro tvorbu vodních zdrojů.....	8
1.3	Ohrožení současnou a očekávanou klimatickou změnou	8
1.4	Ľadové pleso	9
2	Meteorologická data	11
2.1	Analýza teplot vzduchu, 1961–2006	12
2.2	Analýza srážkových úhrnů, 1961-2006	16
2.3	Změna vegetačního porostu.....	19
3	Výpar	25
3.1	Evapotranspirace.....	26
3.1.1	Potenciální evapotranspirace	26
3.1.2	Aktuální evapotranspirace	26
3.2	Evapotranspirace 2010–2020.....	27
3.3	Výhledová evapotranspirace.....	28
3.4	Výpar z vodní hladiny,	31
4	Geneze odtoku	32
4.1	Vodní bilance povodí a jezera	32
4.2	Odtoková výška	35
4.3	Půdní vlhkost	36
5	Zhodnocení vlivu stavu povodí a dosavadní změny klimatu na odtok	39
6	Závěr	41
7	Seznam zkratk symbolů	42
8	Seznam obrázků	43
9	Seznam tabulek	45
10	Seznam literatury	46

1 Úvod a cíle

V dnešní době se stalo téma globálního oteplování nedílnou součástí našich životů. Každý den slyšíme a vidíme jak se atmosféra a oceán oteplují, ledovce tají a zvedá se hladina moří. Průměrná teplota v období 2003–2012 byla o 0,78 °C vyšší než v období 1850–1900. Posledních 30 let bylo nejteplejších za celé období pozorování na zemi (IPCC, 2013).

Režimy ve vysokohorských povodí zatím nejsou příliš objasněny. Povodí jsou velmi členitá a pro přesná řešení by byla zapotřebí hustá síť meteorologických stanic. Protože jsou povodí okrajová a investice do stanic vysoké, není datová síť hustá a data bývají nepřesná (Křeček *et al.*, 2006).

Cílem této práce je analýza vlivu globální klimatické změny na tvorbu odtoku ve vysokohorské oblasti. Konkrétně zpracování dat srážkových úhrnů a teplot pro doposud naměřená data a výhledový stav. Pokrytí vegetací je analyzováno pomocí indexu NDVI z programu Landsat. Dále je v práci uveden výpočet evapotranspirace a vodní bilance. Témata vždy zahrnují teoretickou a výpočtovou část s hodnocením.

1.1 Povodí alpínského typu

Alpínské povodí je definováno jako povodí, jenž se nachází nad horní hranicí lesa (Winterberg a Willett, 2019). Horní hranice lesa je ve střední Evropě vymezena výškovou hranicí přibližně 1300–1800 m n. m. (Holtmeier, 1973), v oblasti Vysokých Tater je tato hranice v rozmezí 1392–1438 m n. m. (Midriak, 2001). Hydrologický režim alpínského povodí je dle klasifikace podle Pardého řízen teplotním režimem. K odtokové dominanci dochází při tání sněhu, maximálního odtoku je dosaženo na konci jara a během léta, v zimě je odtok minimální (Shaw, 2011).

Klasifikace klimatu je založena na analýze teploty v blízkosti zemského povrchu a množství spadlých srážek (Shaw, 2011). Podle Köppenovy klasifikace klimatu patří alpínské klima do kategorie D (oblast mírně chladná – boreální). Teplota v nejteplejším měsíci je vyšší jak 10 °C, naopak teplota v měsíci nejchladnějším je pod hodnotou -3 °C (Novák, 2004). Alpínské povodí můžeme zařadit do kategorie D_{fc} (písmeno f zde znamená rovnoměrné rozložení srážek po celý rok, bez výrazného minima a písmeno c určuje, že maximálně 3 nejteplejší měsíce mají průměrnou teplotu vyšší jak 10 ° a nejvyšší teplota v měsíci je 22 °C)

(Novák, 2004). Podle Köppena zabírala kategorie D na začátku 20. století 21% rozlohy kontinentů (Shaw, 2011).

1.2 Význam pro tvorbu vodních zdrojů

Vysokohorská povodí mají významnou funkci v tvorbě a doplňování vodních zdrojů (Messerli *et al.*, 2004). Voda dokáže přemísťovat velké množství pevných částic, chemikálií a živin. Hydrologické procesy v tocích a jezerech jsou velmi složité, a díky nedostatečnému počtu pozorování je těžké jim porozumět (Křeček *et al.*, 2006). Odtok je ovlivněn mnoha faktory např. srážky s vysokou intenzitou, velký sklon svahů, a slabá vrstva půdy, tedy i téměř nulová schopnost retence. To jsou hlavní důvody, proč můžeme v horách často pozorovat bleskové povodně a také proč všechna voda z hor odtéká a tvoří tak významné vodní toky (De Jong *et al.*, 2005). Voda z vysokohorských toků může být využita jak pro výrobu energie, tak pro úpravu na pitnou vodu, nebo jako voda užitková. Na Slovensku se mezi zdroje vody napájené vysokohorskými toky řadí např. vodní dílo Liptovská Mara. Tyto nádrže musí mít velký zásobní objem, aby dokázaly zachytit velké množství vody, které však nepřitéká pravidelně, v průběhu celého roku. V kotlinách může docházet k zadržování vody v jezerech, ze kterých voda odtéká povrchově, nebo se zasakuje.

Odtok z povodí ve vysokohorských oblastech je závislý na teplotním režimu. Nejmenší průtoky v Tatranských tocích připadají na zimní měsíce, kdy většina srážek vypadává ve formě sněhu. Průtoky se začínají navyšovat v dubnu, kdy se otepluje a začíná tání sněhové pokrývky. Kulminace přichází na začátku léta, v době nejvyšších teplot. Toto je nejvýraznější rozdíl oproti běžným ne vysokohorským tokům, které kulminují již na jaře. (Lacika, 2007). Může však docházet ke zpomalení odtoku, a to díky vegetaci v povodí a morfologii jezer (Křeček *et al.*, 2006).

1.3 Ohrožení současnou a očekávanou klimatickou změnou

Globální oteplování je bezpochyby způsobeno lidskou činností. Nejvýraznější změna začala v době průmyslové revoluce. Změny ale nejsou vidět okamžitě. Dopady lidské činnosti v plné síle pocítujeme až nyní.

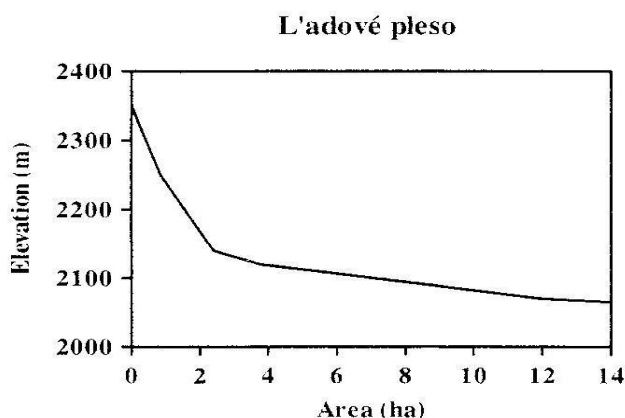
Hlavním projevem klimatické změny je zvyšující se teplota. Globálně zprůměrované kombinované údaje o teplotách povrchu pevniny a oceánu ukazují na oteplení o 0,85 °C v období mezi roky 1880–2012. Vyšší teplota zapříčiňuje vyšší výpar, a tím i menší obsah

vody v půdě. Dalším velice důležitým faktorem je změna rozložení srážek na zemi. V oblastech rovníku a vysokých zeměpisných šířkách dochází k nárůstu srážek, zatímco v oblastech subtropických a oblastech střední šířky, které jsou poměrně suché, dochází k úbytku srážek (IPCC, 2013). Srážky bývají extrémní – velké množství vody spadne za krátký čas. Nedochozí tedy tak dobře k zasakování, protože se velmi rychle nasytí horní vrstva půdy a voda se nemá kam dále zasakovat. To vede k bleskovým povodním. Kvůli vyšším teplotám také nepadají srážky ve formě sněhu, ale deště, který povrchově odtéká. Při postupném tání sněhové pokrývky je infiltrace pomalejší a dochází lépe k doplňování podzemních vod. Avšak v případě rychlé změny teplot, kdy je zem pod vrstvou sněhu stále zmrzlá, dochází k rychlému povrchovému odtoku (The COMET® Program, 2011). Všechny tyto faktory mají za důsledek menší množství vody v krajině a tím i zemědělské, případně hydrologické sucho.

Předpoklady pro příští dekády jsou podobné těm, které se předpokládaly pro konec 21. století, ale v menším rozsahu. Od poloviny 21. století se předpokládá že klimatické změny budou ovlivněny emisními scénáři (IPCC, 2013).

1.4 Ladové pleso

Zbojnícke Ladové pleso se nachází na Slovensku ve Vysokých Tatrách, které jsou součástí Karpatského masivu. Jezero leží v Rovienkové kotlině v nadmořské výšce 2057 m n. m; na úpatí hřebene táhnoucího se od Svišťového štítu po Malý Javorový štít. Jezero vzniklo působením ledovce.



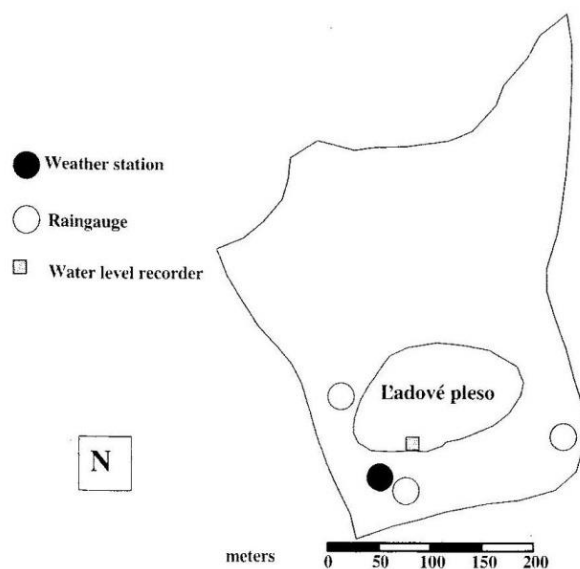
Obr. 1 Hypsonometrická křivka Ladového plesa (Křeček et al., 2006)

Ve Vysokých Tatrách převažuje mírné atlantické kontinentální klima. V oblasti okolo Ľadového plesa se průměrná roční teplota pohybuje okolo 1 °C. Roční úhrn srážek bývá až 2400 mm. Srážkový gradient narůstá s každými 100 m o 50 mm, teplotní naopak klesá o 0,6 C na 100 m. Srážkově nejbohatší bývá červenec s 16 % celkového ročního úhrnu. Nejsušší je měsíc únor, kdy spadne přibližně 4,5 % srážek z celkového ročního úhrnu (Lacika, 2007).

Povodí Ľadového plesa má rozlohu 13,80 ha, z čehož 1,72 ha zabírá jezero. Terén povodí se skládá z 39 % z kamenné suti, z 26 % z travního porostu a 22 % ze skalních formací. Celé povodí se nachází nad hranicí lesa. Povodí je převážně orientováno na jižní stranu. V této oblasti se nachází žulové podloží s mělkými podzolovými půdami.

V povodí jsou zastoupena dvě vegetační pásma podle Kunskeho (1974): *alpínské* (2200–2400 m n. m.) s horskými loukami na kterých se nachází vysokohorská rostlinná společenstva a *subnivální* ve kterém se nachází hřebenové části s velmi slabým půdním krytem. Vegetace je zde zastoupena především travinami (třtinou chloupkatou, bika, a jiné).

Ľadové pleso má maximální hloubku 18 m a jeho objem je $101,1 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (Baláž, 2010). V jezeře dominuje relativně pomalý podpovrchový odtok. Tento jev je způsoben morfologií povrchu (Křeček *et al.*, 2006).



Obr. 2 : Schema Ľadového plesa s observací hydrometeorologických prvků (Křeček *et al.*, 2006)

2 Meteorologická data

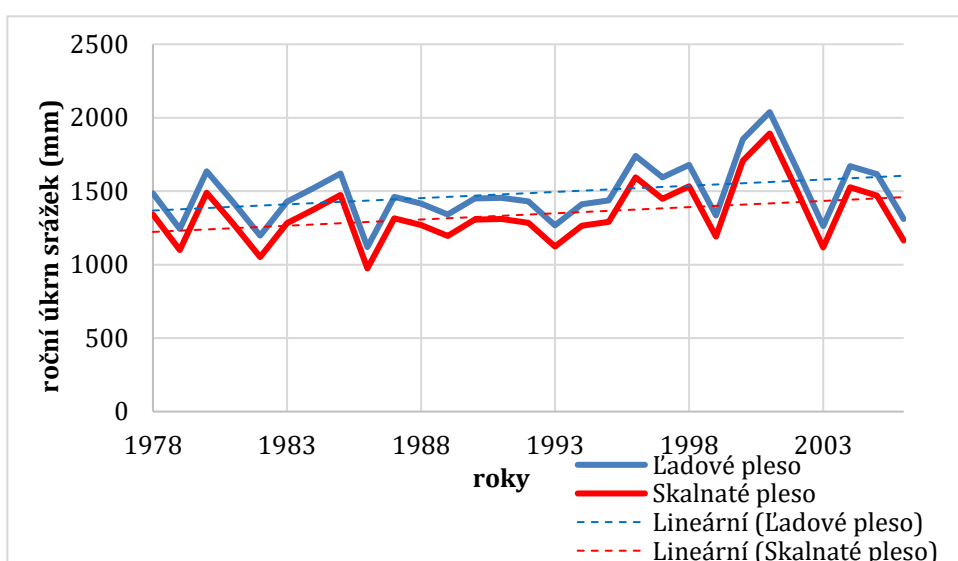
Ve vzdálenosti cca 5 km od Ľadového plesa se nachází klimatologická stanice Slovenského hydrometeorologického ústavu „Skalnaté pleso“ (souřadnice: 49° 11' N a 20° 13,5' E) s pozorováním teploty vzduchu a úhrnů atmosférických srážek od roku 1946. Od roku 2006 je v povodí Ľadového plesa („Ľadové pleso“) doplňková automatická meteorologická stanice (49° 11' N a 20° 9' E), provozovaná Hydrobiologickým ústavem ČSAV. Na této stanici jsou zaznamenávány: teplota a vlhkost vzduchu, úhrn atmosférických srážek, globální radiace, rychlost větru, a teplota a vlhkost půdy (v hloubce 10 cm). Hodnoty jsou v 10minutových intervalech přenášeny do systému ALA (firma Sekanina, Bučovice).

Pro zpracování dostupných dat bylo v této práci použito období klimatického normálu 1961-1990, které bylo porovnáváno s obdobím současným a výhledovým (2071–2100). Byla ověřena přímá korelace mezi daty ze stanic „Ľadové pleso“ a „Skalnaté pleso“ (Obr. 3, Tab. 1). Pomocí korelace byl získán výškový srážkový gradient: 53 mm/100 m. U ročních srážkových úhrnů byl analyzován rostoucí trend, statisticky významný, s 95 % pravděpodobností: $R_s=0,286 > R_{crit}=0,207$. Trendy v časových řadách dat byly posuzovány pomocí Spearmanova součinitele pořadové korelace (WMO, 2001).

Tab. 1 Porovnání ročních srážkových úhrnů, Ľadové pleso, Skalnaté pleso, 1978-2006

rok	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
Ľadové pleso	1485.7	1244.1	1635	1423.3	1197.6	1428.8	1522.2	1620.1	1119.6	1461.6	1414.7	1341.7	1450.9	1453.96	1431
Skalnaté pleso	1340.2	1098.6	1489.5	1277.8	1052.1	1283.3	1376.7	1474.6	974.1	1316.1	1269.2	1196.2	1305.4	1309.8	1285.5

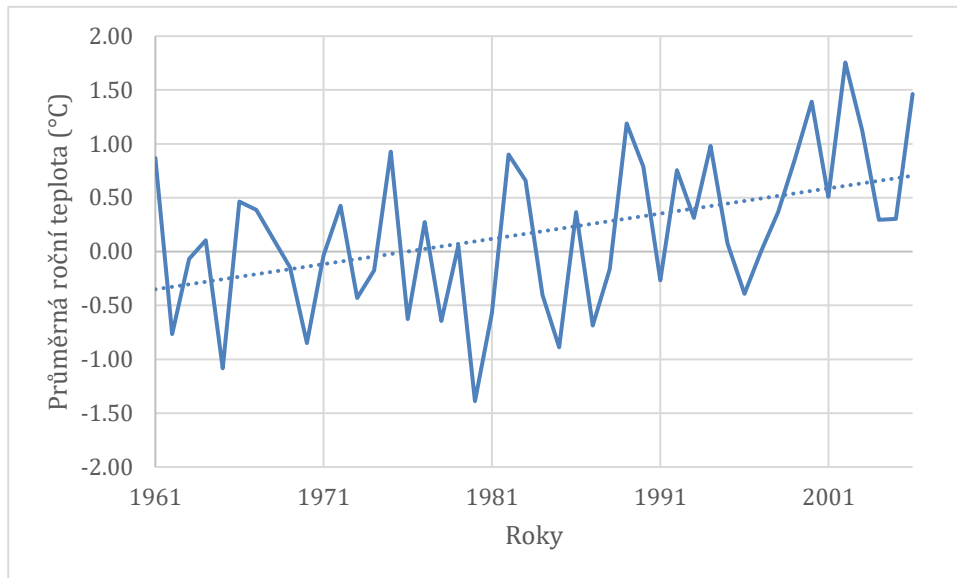
rok	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Ľadové pleso	1267.9	1411.3	1436.8	1740.1	1593.9	1679.1	1335.7	1852.2	2038.1	1659	1263.3	1671	1616.2	1310.5
Skalnaté pleso	1122.4	1265.8	1291.3	1594.6	1448.4	1533.6	1190.2	1706.7	1892.6	1513.5	1117.8	1525.5	1470.7	1165



Obr. 3 Graf ročních srážkových úhrnů a jejich trendy, Ľadové pleso, Skalnaté pleso, 1978-2006

2.1 Analýza teplot vzduchu, 1961-2006

Byl analyzován statisticky významný trend v časové řadě průměrných ročních teplot s 95 % pravděpodobností: Spearmanův součinitel $R_s = 0,41$ je větší než $R_{crit} = 0,37$.



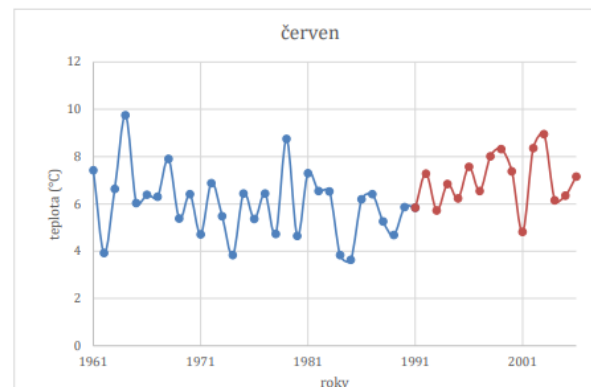
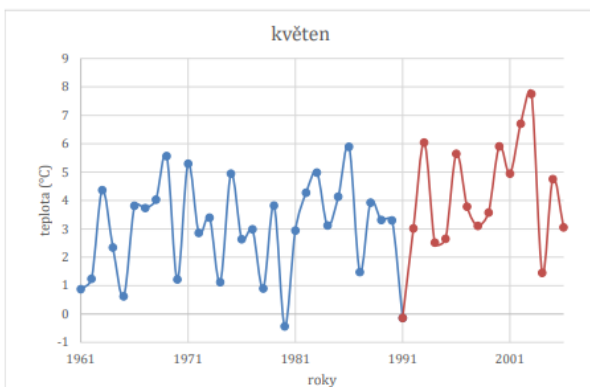
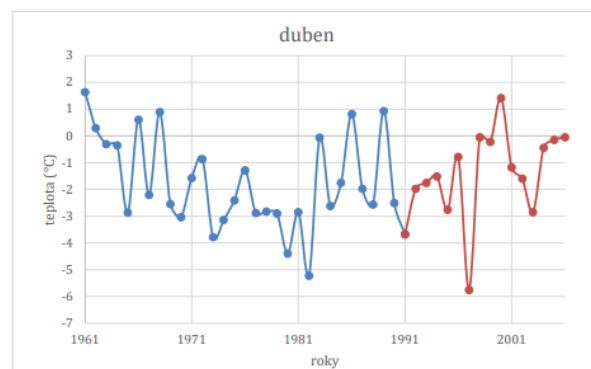
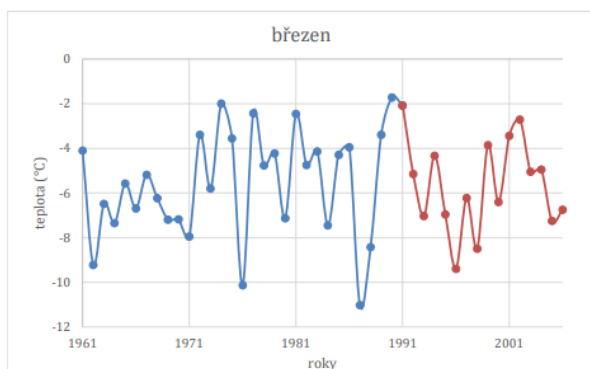
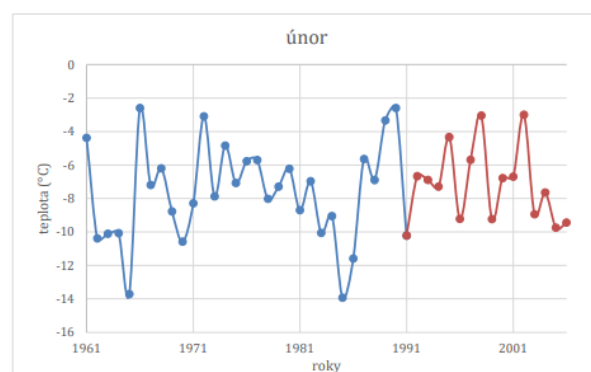
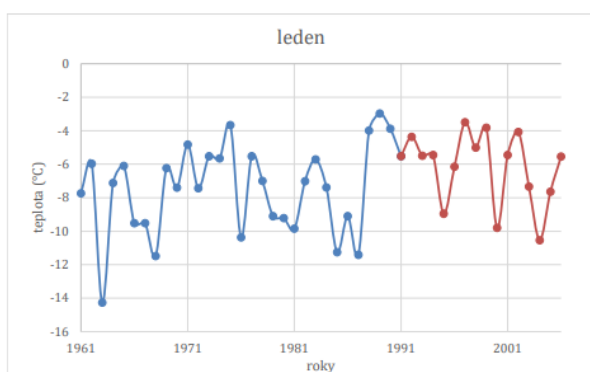
Obr. 4 Průměrná roční teplota vzduchu, Ladové pleso, 1961-2006

Tab. 2 Základní charakteristiky statistického souboru dat: průměrné roční teploty vzduchu, Ladové pleso, 1961-1990

<u>Teplota, klim. normál</u>	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
aritmetický průměr	-7.54	-7.57	-5.60	-1.72	3.09	5.99	7.59	7.64	4.88	1.85	-3.05	-6.12
maximum	-2.97	-2.60	-1.72	1.63	5.89	9.75	9.80	9.54	8.48	5.15	0.42	-2.22
minimum	-14.28	-13.94	-11.03	-5.22	-0.44	3.63	4.91	5.04	1.18	-3.74	-7.06	-8.89
rozptyl	7.00	8.56	5.57	2.87	2.52	1.98	1.81	1.48	3.57	3.44	4.23	3.06
rozptyl, výběrový soubor	7.25	8.85	5.77	2.96	2.61	2.05	1.87	1.53	3.69	3.56	4.38	3.17
směrodatná odchylka	2.65	2.92	2.36	1.69	1.59	1.41	1.35	1.21	1.89	1.85	2.06	1.75
směrodatná odchylka, výběrový soubor	2.69	2.97	2.40	1.72	1.62	1.43	1.37	1.24	1.92	1.89	2.09	1.78
součinitel variace	-2.85	-2.59	-2.37	-1.02	1.95	4.25	5.64	6.29	2.59	1.00	-1.48	-3.49
součinitel variace, výběrový soubor	-2.80	-2.54	-2.33	-1.00	1.91	4.18	5.55	6.18	2.54	0.98	-1.46	-3.44
součinitel asymetrie	-0.42	-0.23	-0.36	0.25	-0.31	0.44	0.01	-0.42	-0.16	-0.78	-0.05	0.38

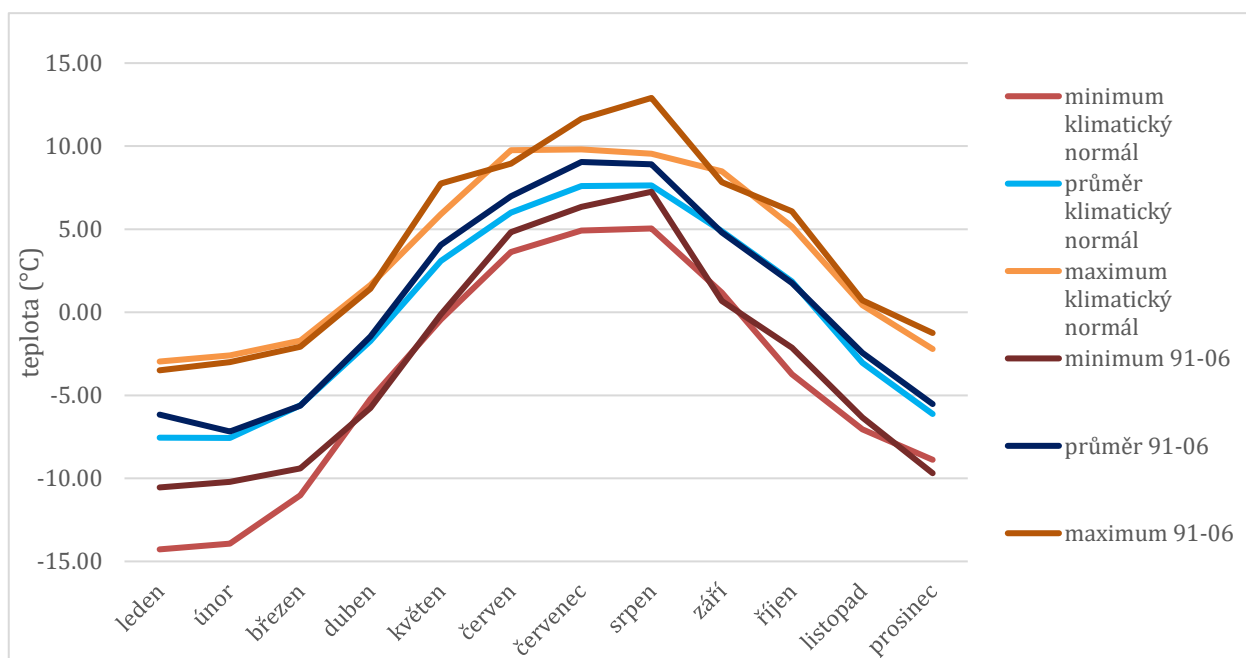
Tab. 3 Základní charakteristiky statistického souboru dat: průměrné roční teploty vzduchu, Ladové pleso, 1991-2006

Teplota, období 91-06	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
aritmetický průměr	-6.17	-7.18	-5.63	-1.46	4.05	6.97	9.05	8.92	4.80	1.76	-2.44	-5.53
maximum	-3.50	-3.00	-2.08	1.41	7.75	8.95	11.65	12.90	7.83	6.08	0.71	-1.25
minimum	-10.55	-10.22	-9.40	-5.76	-0.14	4.81	6.34	7.25	0.68	-2.13	-6.34	-9.70
rozptyl	4.22	4.90	3.92	2.77	3.99	1.17	2.52	2.05	3.05	7.31	3.87	4.73
rozptyl, výběrový soubor	4.51	5.22	4.19	2.96	4.26	1.25	2.69	2.18	3.25	7.80	4.13	5.05
směrodatná odchylka	2.06	2.21	1.98	1.67	2.00	1.08	1.59	1.43	1.75	2.70	1.97	2.18
směrodatná odchylka, výběrový soubor	2.12	2.29	2.05	1.72	2.06	1.12	1.64	1.48	1.80	2.79	2.03	2.25
součinitel variace	-3.00	-3.24	-2.84	-0.88	2.03	6.45	5.70	6.23	2.75	0.65	-1.24	-2.54
součinitel variace, výběrový soubor	-2.91	-3.14	-2.75	-0.85	1.96	6.25	5.52	6.04	2.66	0.63	-1.20	-2.46
součinitel asymetrie	-0.78	0.52	0.00	-0.82	-0.09	-0.02	-0.27	1.24	-0.21	0.08	-0.26	0.16





Obr. 5 Průměrné měsíční teploty, Ladové pleso, 1961-2006



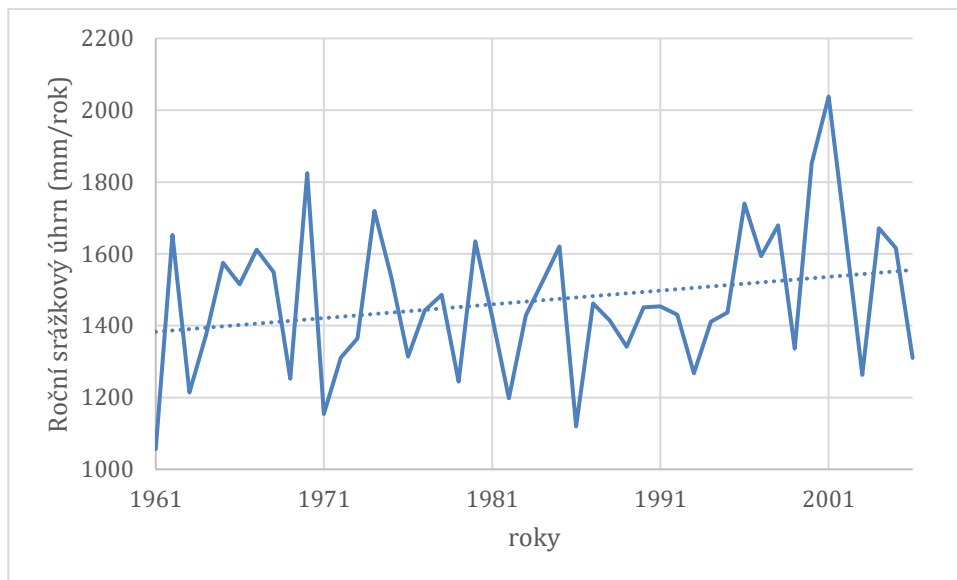
Obr. 6 Porovnání průměrných, maximálních a minimálních měsíčních teplot v období klimatického normálu a sledovaného období 1991-2006, Ladové pleso

Tab. 4 Porovnání průměrných, maximálních a minimálních měsíčních teplot, Ladové pleso, 1991-2006

		leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
Klimatický normál 1961-1990	minimum	-14.28	-13.94	-11.03	-5.22	-0.44	3.63	4.91	5.04	1.18	-3.74	-7.06	-8.89
	průměr	-7.54	-7.57	-5.60	-1.72	3.09	5.99	7.59	7.64	4.88	1.85	-3.05	-6.12
	maximum	-2.97	-2.60	-1.72	1.63	5.89	9.75	9.80	9.54	8.48	5.15	0.42	-2.22
Období 1991-2006	minimum	-10.55	-10.22	-9.40	-5.76	-0.14	4.81	6.34	7.25	0.68	-2.13	-6.34	-9.70
	průměr	-6.17	-7.18	-5.63	-1.46	4.05	6.97	9.05	8.92	4.80	1.76	-2.44	-5.53
	maximum	-3.50	-3.00	-2.08	1.41	7.75	8.95	11.65	12.90	7.83	6.08	0.71	-1.25

2.2 Analýza srážkových úhrnů, 1961-2006

Byl potvrzen statisticky významný rostoucí trend v časové řadě ročních srážkových úhrnů: součinitel pořadové korelace $R_s = 0,21$ je větší než $R_{s_{crit}} = 0,16$ na hladině významnosti $p = 5\%$



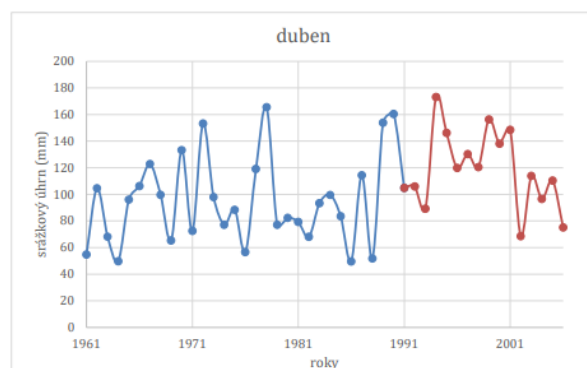
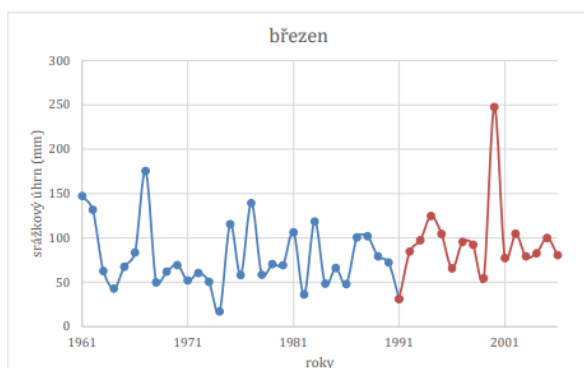
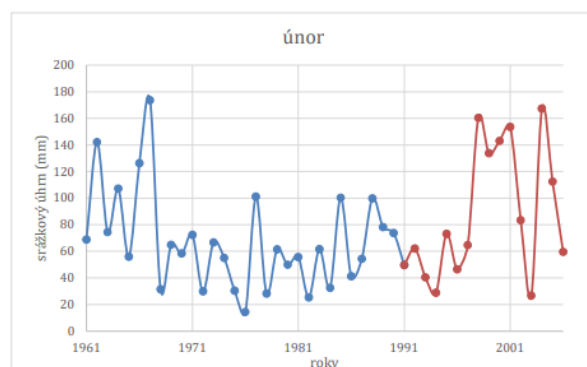
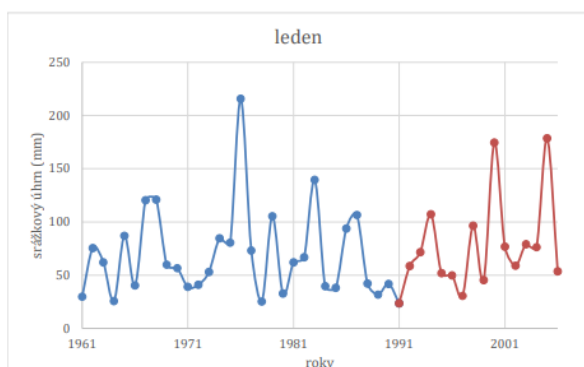
Obr. 7 Průměrné roční srážkové úhrny, Ladové pleso, 1961-2006

Tab. 5 Základní charakteristiky statistického souboru dat: průměrné roční teploty vzduchu, Ladové pleso, 1961-1990

<u>Srážkv. klim. normál</u>	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
aritmetický průměr	69.59	67.81	78.69	94.83	144.11	200.47	204.29	175.73	121.85	96.40	90.33	83.05
maximum	215.63	173.63	175.53	165.63	265.63	391.23	488.13	322.93	275.53	250.33	179.33	172.53
minimum	25.13	14.33	17.03	49.63	57.53	90.83	109.73	33.03	27.63	18.83	42.33	15.83
rozptyl	1679.38	1285.76	1289.84	1090.78	2621.56	4359.92	6560.03	4016.84	3205.95	3297.13	1177.11	1609.13
rozptyl, výběrový soubor	1737.29	1330.10	1334.32	1128.39	2711.96	4510.26	6786.24	4155.35	3316.50	3410.82	1217.70	1664.62
směrodatná odchylka	40.98	35.86	35.91	33.03	51.20	66.03	80.99	63.38	56.62	57.42	34.31	40.11
směrodatná odchylka, výběrový soubor	41.68	36.47	36.53	33.59	52.08	67.16	82.38	64.46	57.59	58.40	34.90	40.80
součinitel variace	1.70	1.89	2.19	2.87	2.81	3.04	2.52	2.77	2.15	1.68	2.63	2.07
součinitel variace, výběrový soubor	1.67	1.86	2.15	2.82	2.77	2.98	2.48	2.73	2.12	1.65	2.59	2.04
součinitel asymetrie	1.60	1.04	0.89	0.62	0.30	0.88	1.53	0.26	0.84	1.12	0.51	0.50

Tab. 6 Základní charakteristiky statistického souboru dat: průměrné roční teploty vzduchu, Ladové pleso, 1991-2006

Srážky období 91-06	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
aritmetický průměr	76.94	87.81	95.12	118.59	149.62	192.83	238.53	166.32	131.36	115.96	99.88	74.56
maximum	178.53	167.33	247.63	173.13	246.33	335.83	502.33	285.63	257.53	232.33	176.63	178.53
minimum	23.53	26.73	31.13	68.53	57.33	111.63	78.23	66.03	34.33	25.73	57.63	28.93
rozptyl	1859.58	2282.36	2001.23	797.84	1792.14	3368.32	12351.6	5220.03	4355.07	3561.24	1445.70	1202.20
rozptyl, výběrový soubor	1983.55	2434.52	2134.65	851.03	1911.62	3592.88	13175.0	5568.03	4645.41	3798.65	1542.08	1282.34
směrodatná odchylka	43.12	47.77	44.74	28.25	42.33	58.04	111.14	72.25	65.99	59.68	38.02	34.67
směrodatná odchylka, výběrový soubor	44.54	49.34	46.20	29.17	43.72	59.94	114.78	74.62	68.16	61.63	39.27	35.81
součinitel variace	1.78	1.84	2.13	4.20	3.53	3.32	2.15	2.30	1.99	1.94	2.63	2.15
součinitel variace, výběrový soubor	1.73	1.78	2.06	4.07	3.42	3.22	2.08	2.23	1.93	1.88	2.54	2.08
součinitel asymetrie	1.30	0.42	2.24	0.07	0.00	0.93	0.92	0.31	0.52	0.13	0.37	1.43

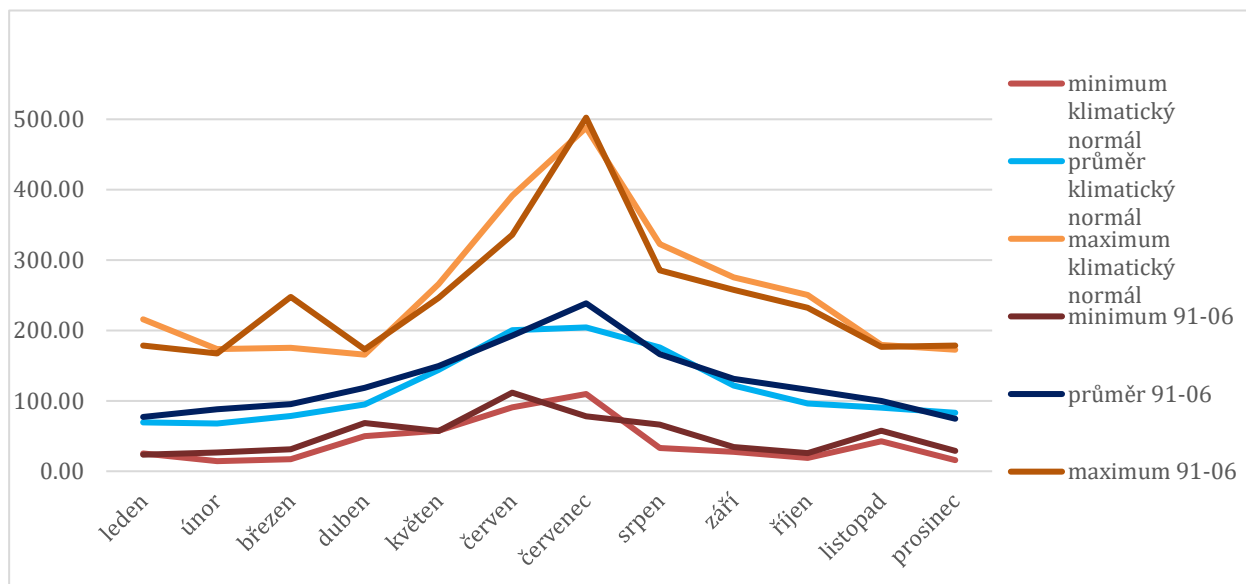




Obr. 8 Průměrné srážkové úhrny, Ladové pleso, 1961-2006

Tab. 7 Porovnání průměrných, maximálních a minimálních měsíčních teplot, Ladové pleso, 1991-2006

		leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
Klimatický normál 1961-1990	minimum	25.13	14.33	17.03	49.63	57.53	90.83	109.73	33.03	27.63	18.83	42.33	15.83
	průměr	69.59	67.81	78.69	94.83	144.11	200.47	204.29	175.73	121.85	96.40	90.33	83.05
	maximum	215.63	173.63	175.53	165.63	265.63	391.23	488.13	322.93	275.53	250.33	179.33	172.53
Období 1991-2006	minimum	23.53	26.73	31.13	68.53	57.33	111.63	78.23	66.03	34.33	25.73	57.63	28.93
	průměr	76.94	87.81	95.12	118.59	149.62	192.83	238.53	166.32	131.36	115.96	99.88	74.56
	maximum	178.53	167.33	247.63	173.13	246.33	335.83	502.33	285.63	257.53	232.33	176.63	178.53



Obr. 9 Porovnání průměrných, maximálních a minimálních měsíčních srážkových úhrnů v období klimatického normálu a sledovaného období 1991-2006, Ladové pleso

2.3 Změna vegetačního porostu

Typ a hustotu porostu můžeme určit pomocí normalizovaného diferenčního vegetačního indexu NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Když sluneční světlo zasáhne objekt, jsou některé vlnové délky absorbovány a jiné odraženy. Pigment v listech rostlin silně absorbuje viditelné světlo (0,4-0,7 μm) pro použití v procesu fotosyntézy. Naopak silně odráží blízké infračervené světlo (0,7-1,1 μm). Porovnáním těchto hodnot je měřeno relativní množství vegetace. Index měříme vždy po jednotlivých pixelech. Obecně platí, že pokud je více odraženého záření v blízkých infračervených vlnách než ve vlnách viditelného záření, vegetace bude pravděpodobně hustá, může obsahovat například les. Pokud bude rozdíl v intenzitě vlnových délek malý, vegetace bude řídká (travní porost). Hodnoty NDVI se pohybují od -1 do +1, 0 a menší hodnoty jsou neživá příroda, sníh, voda. Čím je kladná hodnota vyšší tím je vegetace hustší (NASA, 2000).

Vzorec pro NDVI je možno popsat jako (1):

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (1)$$

NIR blízké infračervené záření

VIS viditelné záření

NDVI bylo určeno pomocí programu Landsat. Landsat je společný program NASA a USGS, který snímá povrch země pomocí družic od roku 1972 až do současnosti. Družice obíhají zemi po opakované dráze. Oběh země trvá 98.9 min, do výchozí pozice se družice dostane po 16 - ti dnech. Družice za tuto dobu pořídí snímky mezi 81°N a 81°S. Tyto snímky se využívají pro pozorování změn způsobených přírodními procesy nebo působením lidstva (gisat).

Pro naše účely byly použity programy Landsat 8, Landsat 7 a Landsat 5. Na palubách družic jsou umístěny multispektrální senzory (MSS), které snímají povrch země v různých frekvenčních rozsazích v oblasti elektromagnetického spektra a Thematic Mapper (TM) (USGS). Měření mechanickým skenerem TM probíhá pomocí pásem, jejich počet se liší podle verze družice. Měření probíhá buď ve viditelném světle nebo v infračerveném světle (gisat). Každé pásmo má jinou vlnovou délku. Snímky z Landsat 5 se skládají ze sedmi spektrálních pásem s rozlišením 30 m/pixel pro pásma 1-5 a 7, pásmo 6 je termální infračervené záření jehož snímky mají velikost 120 m/pixel, ale je přeformátováno na velikost 30 m/pixel. Landsat 7 má 8 pásem. Pásma 1-7 mají rozlišení 30 m/pixel. Pásmo 8 je panchromatické a má rozlišení 15 m/pixel. Doposud nejnovější Landsat 8 se skládá z 11 spektrálních pásem. Přidané ultramodré pásmo se hodí pro pobřežní oblasti a studie aerosolu. Nové pásmo 9 se hodí pro detekci cirrusových mraků. Pásma 10 a 11 jsou vhodná pro analýzu povrchových teplot (USGS).

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 - Coastal aerosol	0.43-0.45	30
Band 2 - Blue	0.45-0.51	30
Band 3 - Green	0.53-0.59	30
Band 4 - Red	0.64-0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	30
Band 6 - SWIR 1	1.57-1.65	30
Band 7 - SWIR 2	2.11-2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50-0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36-1.38	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.6-11.19	100
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50-12.51	100

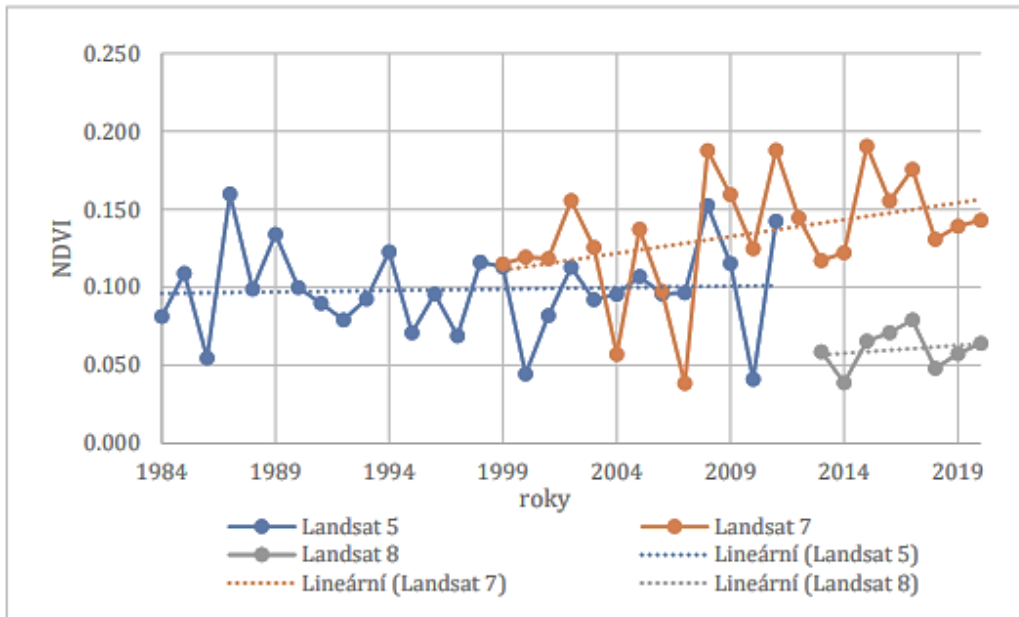
Obr. 10 Seznam pásem používaných na družici Landsat 8, jejich vlnová délka a rozlišení (USGS)

Data jsou ucelena do scén, které se překrývají. o rozměrech přibližně 185 x 175 km. Vypuštění nové družice Landsat 9 je plánováno na září 2021.

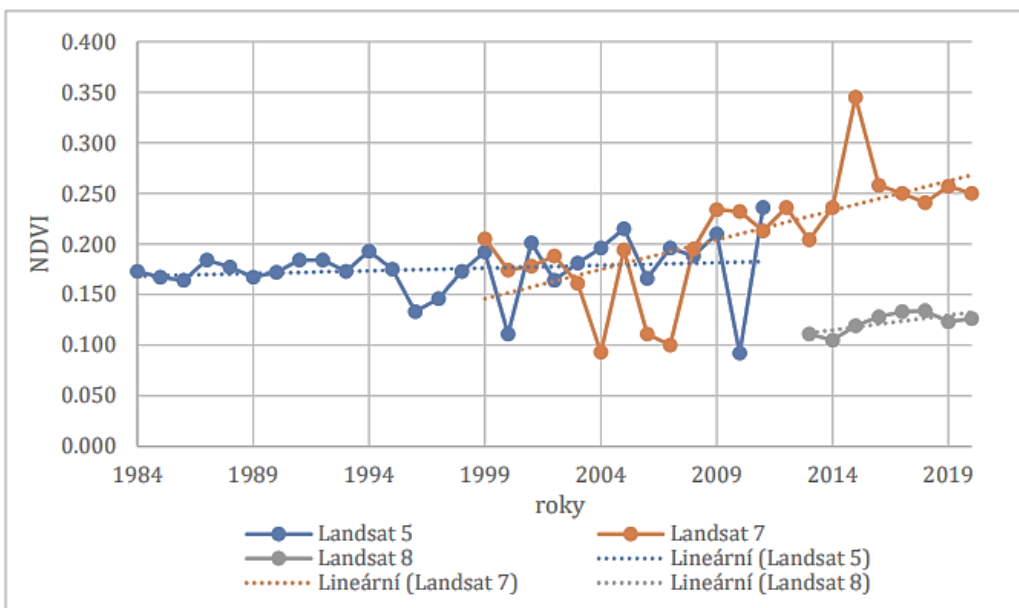
Data není možné použít v případě, že se jedná o oblast vysoké zeměpisné šířky ($> 65^\circ$), v oblastech s nepříznivými podmínkami jako jsou zasněžené a hyper suché oblasti, tam kde je malý úhel slunečního záření, pobřežní oblasti a v oblastech s vysokou koncentrací mraků (Google). Mraky totiž zastiňují povrch a data pak zobrazují anomální hodnoty (nižší hodnoty oproti reálu). V námi sledované oblasti je bohužel výskyt mraků častý, nejistota měření je tedy vysoká.

Dalšími negativními faktory, které můžou ovlivnit výsledek je atmosférická korekce algoritmů, která je nedokonalá, zejména při kratších viditelných vlnových délkách. Družice snímají povrch každá v jiném čase, stav povrchu se tedy může změnit, zejména pokrytí vegetací (ROY et al., 2016). V našem případě bude pozorování zatěžkáno chybou, která je způsobena velikostí povodí a jezera. Je totiž nereálné, aby jezero negativně neovlivnilo okolní pixely, vzhledem k jejich velikosti.

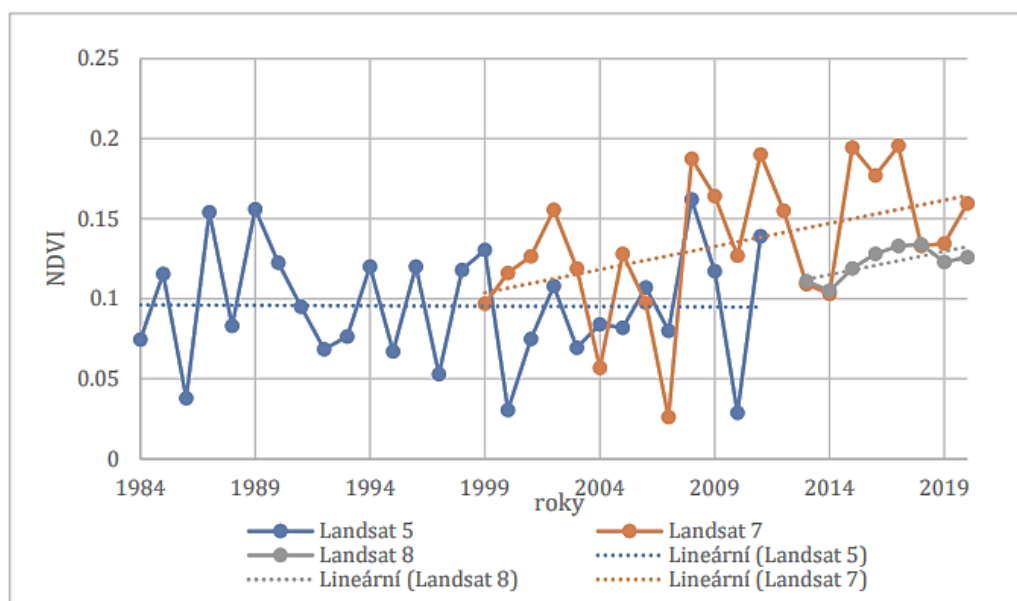
Vzhledem k změně klimatu byl pozorován vývoj vegetace po delší časový úsek. Pro porovnání jsme použili data z programů Landsat 5, Landsat 7 a Landsat 8. Každá verze funguje odlišně viz, výše, a proto můžeme pozorovat rozdílné výsledky. Na Obr. 11 je zobrazeno porovnání průměrné hodnoty NDVI za vegetační období a trendy. Vegetační období pro traviny nacházející se v povodí, je možné si definovat jako období, kdy je průměrná měsíční teplota vyšší než 3°C . Nejčastěji se jedná o měsíce květen, červen–září, říjen. Data pro porovnání průměrů a mediánu vegetačního období byla očištěna o chybná pozorování (hodnoty menší než 0). Hodnoty mediánu vegetačního období mají podobný průběh jako hodnoty průměru za vegetační období (Obr. 13). Na datech z Landsat 5 můžeme vidět konstantní trend. Trend u pozorování z Landsat 7 je rostoucí. Pozorovaná řada dat z Landsat 8 je příliš krátká pro určení trendu. Dá se tedy říct, že pokrytí vegetací bylo konstantní a od roku 2005 se hodnota zvyšuje. Stejný průběh je patrný i na hodnotách maximálního pokrytí vegetací (Obr. 12) V závěru se dá konstatovat, že pokrytí vegetací se zvyšuje s rostoucí teplotou, která prodlužuje vegetační období a vytváří tak lepší podmínky pro život rostlin.



Obr. 11 Porovnání průměrných hodnot NDVI za vegetační období z programů Landsat 5, 7, 8, povodí Ľadového plesa, 1984-2020



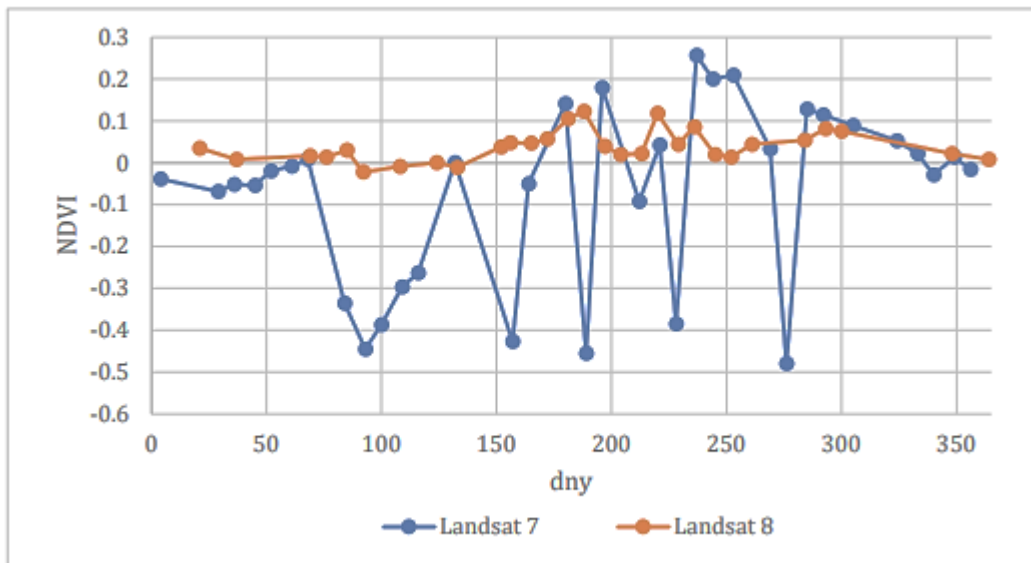
Obr. 12 Porovnání maximálních hodnot NDVI z programů Landsat 5, 7, 8, povodí Ľadového plesa, 1984-2020



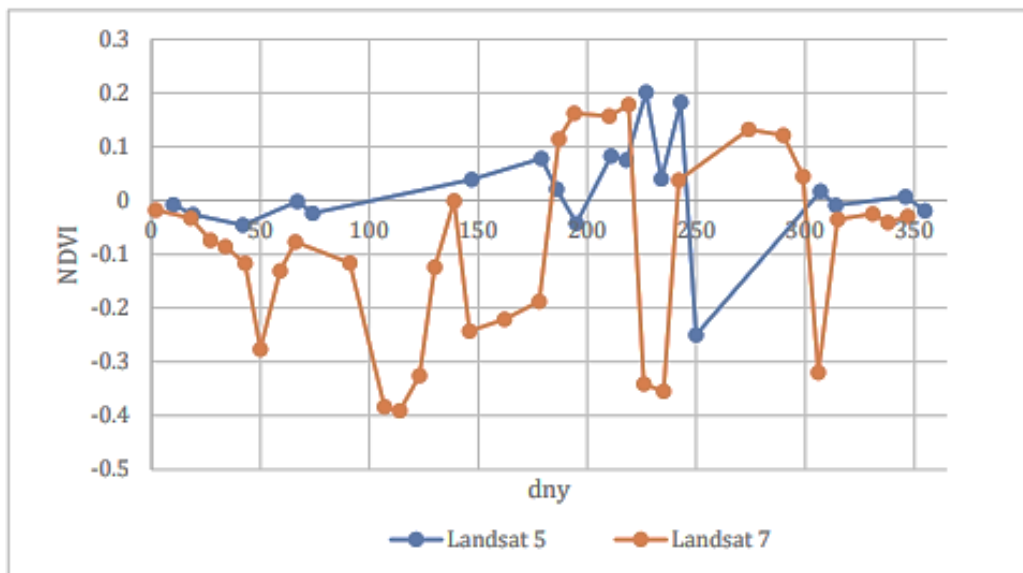
Obr. 13 Porovnání mediánu NDVI za vegetační období z programů Landsat 5, 7, 8, povodí Ladového plesa, 1984-2020

Dále bylo provedeno porovnání měření v průběhu roku pomocí jednotlivých programů. Na Obr. 14 je zobrazeno porovnání dat z programu Landsat 7 a 8. Data z Landsat 7 mají větší rozptyl, který je způsoben chybami v měření, které jsou popsány výše. Reálný průběh vývoje vegetace by bylo možné popsat jako spojnici vrcholů ve vegetačním období. Chyby v měření jsou patné i v datech z Landsat 8, avšak jejich rozptyl není tak extrémní. Minimální pokrytí vegetací můžeme pozorovat v zimních a jarních měsících, růst je pozorovatelný přibližně od začátku května s vrcholem v měsíci srpnu. Zde začíná křivka opět klesat. Podobný průběh můžeme pozorovat na datech z Landsat 5 a Landsat 7 (Obr. 15).

Důvodů, proč jsou data odlišná a je těžké je porovnat je několik. Zaprvé, každá družice pořizuje snímek v jiný čas, pokrytí vegetací se tedy může lišit stejně jako počasí nad lokalitou. Může také dojít k sněhovým přeháňkám, které znehodnotí měření. Každá družice má jinou přesnost a jinou vlnovou délku pásem viz. výše. Proto vidíme, že i když proběhne měření ve stejný den, data mohou být odlišná.



Obr. 14 Porovnání hodnot NDVI z programů Landsat 7 a Landsat 8 na povodí Ladového plesa, rok 2019



Obr. 15 Porovnání hodnot NDVI z programů Landsat 5 a Landsat 7 na povodí Ladového plesa, rok 2001

3 Výpar

Rozlišujeme čtyři druhy výparu. Výpar z vodní hladiny, výpar z povrchu půdy (evaporace), výpar z povrchu rostlinného krytu (evapotranspirace) a transpiraci rostlin (Kemel, 1996). Pro účely této bakalářské práce nás bude zajímat výpar z volné hladiny a výpar z povrchu rostlinného krytu takzvaná evapotranspirace. Výpar je vypařené množství vody za časovou jednotku. Udává se v mm k časové jednotce např. hodinám. Hodnoty v této práci počítáme po měsících, případně za období hydrologického roku (1. listopad-31. říjen).

Evaporace je ovlivněna mnoha faktory. Prvním je sluneční záření, které je hlavním zdrojem světla a tepla. Mění se v závislosti podle zeměpisné šířky a ročního období. Druhým významným faktorem je teplota. Můžeme měřit teplotu vzduchu a teplotu povrchu. Čím je teplota vyšší, tím snáze dochází k evaporaci. Proto by se dalo říct, že výpar je největší v tropických oblastech, zatímco nejmenší v polárních oblastech. Takto však můžeme uvažovat, jen pokud nebudeme brát v úvahu další faktory, jako je například sytostní doplněk a vlhkost. Sytostní doplněk je množství páry, které může vzduch absorbovat předtím, než dojde k nasycení. Sytostní doplněk lze určit jako rozdíl mezi napětím nasycených vodních par a aktuálním napětím vodních par v ovzduší. Čím je sytostní doplněk menší, tím více je možno vody vypařit. Dalším významným faktorem je vítr. Ten totiž může odvádět vodou nasycený vzduch a přinést vzduch suchý, který bude moci absorbovat vodní páru, čímž se zvýší evaporace. Limitujícím faktorem je množství vody, které je k dispozici. V případě že je půda vysušena, výpar nebude probíhat (Shaw, 2011).

Transpirace je výpar z rostlin. Kromě výše zmíněných faktorů ovlivňující její množství je ovlivněna hlavně typem a velikostí rostliny. Rychlost transpirace je řízena rostlinou, tedy jejími průduchy v listech, které fungují jako ventily regulující průchod vody podle množství světla (Shaw, 2011).

3.1 Evapotranspirace

Evapotranspirace vzniká sloučením evaporace a transpirace tedy výparu z povrchu a výparu z rostlin. Evapotranspiraci dělíme na potencionální, aktuální referenční. *Potenciální evapotranspirace je výpar z nízkého konstantně vysokého nízkého vegetačního pokryvu úplně zakrývajícího povrch a s dostatkem vody* (Kofroňová, 2014, s.13). Aktuální evapotranspirace je množství skutečně vypařené vody. Referenční evapotranspirace je výpar z hypotetického povrchu, určený metodou FAO. Tento typ se používá pro porovnávání různých lokalit (Kofroňová, 2014; Pažourková 2018).

3.1.1 Potenciální evapotranspirace

Potencionální evapotranspiraci můžeme počítat více způsoby. Pro účely této práce byl vybrán výpočet podle Hamonova vzorce, který používáme pro porovnání období 2010-2020 a období 2071-2100. Důvodem tohoto výběru je nedostatek vstupních dat, která pro výpočet potřebujeme. Pro období 2071-2100 máme k dispozici pouze hodnoty teploty a srážky.

Evapotranspiraci podle Hamona počítáme dle vzorce (2), který je založen na průměrné denní teplotě:

$$ETP - HAM = 2,98 \cdot N \cdot e_s / (T_a + 273,3) \quad (2)$$

N maximální možná doba slunečního svitu [hod/den]

e_s napětí nasycených vodních par [mm]

T_a průměrná teplota vzduchu [°C]

3.1.2 Aktuální evapotranspirace

Aktuální evapotranspiraci jsme se rozhodli počítat podle Grindleyova postupu, který je založen na deficitu půdní vlhkosti SMD (3).

$$SMD = RC + ETP - P \quad (3)$$

RC parametr vegetace [mm]

ETP Potenciální evapotranspirace dle Hamona [mm]

P Srážkový úhrn [mm]

Evapotranspirace se počítá v časovém kroku $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ (dny, měsíce) podle vztahu (4).

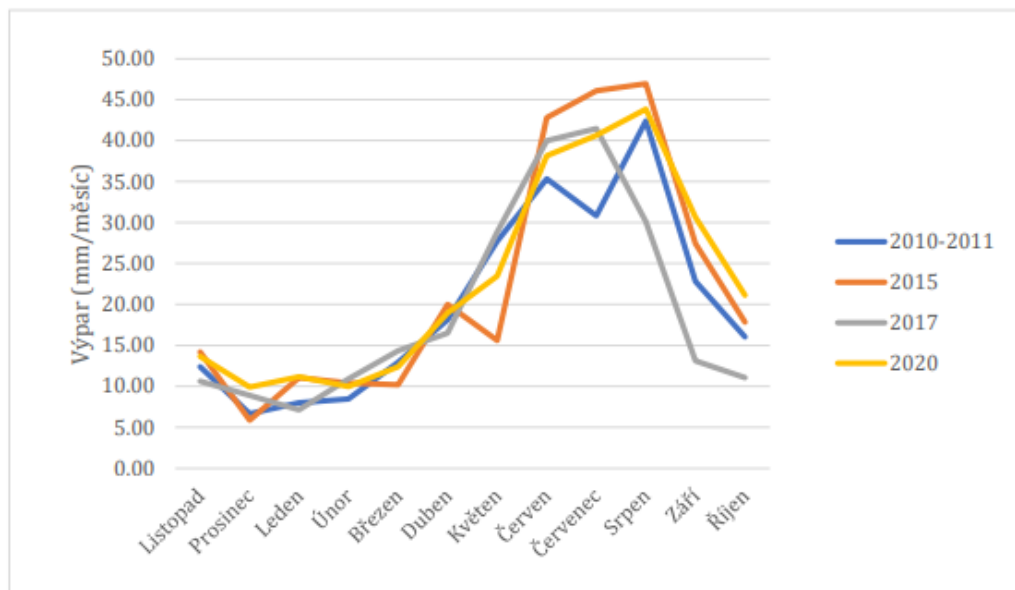
$$ET_i = SMD_i - SMD_{i-1} + P_{si} \quad (4)$$

3.2 Evapotranspirace 2010–2020

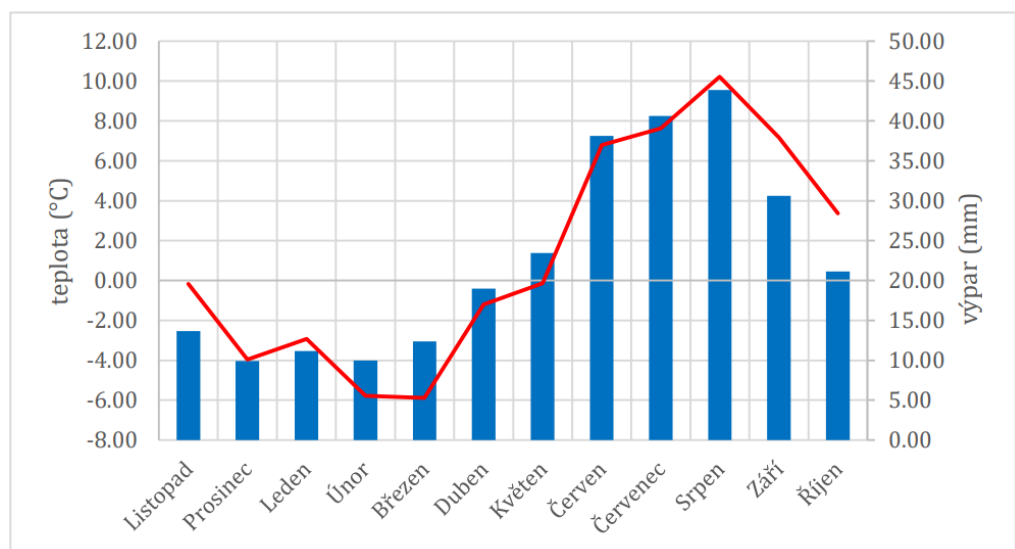
V této kapitole jsou uvedeny výsledky výpočtů evapotranspirace pomocí výše zmíněných metod. Výpočty byly provedeny pro hydrologický rok, pouze pro rok 2011 začíná měření již v měsíci srpnu. Hodnoty jsou uvedeny v milimetrech za měsíc.

Tab. 8 Potenciální evapotranspirace podle Hamona pro jednotlivé měsíce, Ladové pleso, 2010-2020

	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen
2010-2011	12.39	6.65	7.98	8.46	12.92	18.12	27.72	35.32	30.82	42.42	22.81	16.02
2015	14.18	5.87	11.07	10.39	10.20	20.01	15.61	42.78	46.06	46.97	27.41	17.84
2017	10.64	8.89	7.16	10.91	14.34	16.52	28.83	39.99	41.48	30.09	13.11	11.07
2020	13.67	9.92	11.16	9.98	12.37	18.97	23.45	38.13	40.61	43.86	30.62	21.12



Obr. 16 Změna potenciální evapotranspirace podle Hamona v průběhu desetiletí, Ladové pleso, 2010-2020



Obr. 17 Graf závislosti evapotranspirace na teplotě, průměrné hodnoty za měsíc, Ladové pleso, 2020

Tab. 9 Aktuální evapotranspirace pro jednotlivé měsíce, Ladové pleso, 2010-2020

	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen
2010-2011	12.39	6.65	7.98	8.46	12.92	18.12	27.72	35.32	30.82	42.42	22.81	16.02
2015	14.18	5.87	11.07	10.39	10.20	20.01	15.61	42.78	46.06	46.97	27.41	17.84
2017	10.64	8.89	7.16	10.91	14.34	16.52	28.83	39.99	41.48	30.09	13.11	11.07
2020	13.67	9.92	11.16	9.98	12.37	18.97	23.45	38.13	40.61	43.86	30.62	21.12

Z výše uvedených grafů a tabulek (Obr. 16, Tab. 8, 9) můžeme zhodnotit vývoj evapotranspirace mezi roky 2010 a 2020. Aktuální evapotranspirace se rovná potenciální evapotranspiraci podle Hamona, protože v povodí je dostatečné množství srážek, tedy i vody, která může být vypařována.

Z Obr. 17 je dobře patrné rozdělení průměrných měsíčních teplot a hodnot průměrného měsíčního výparu. Můžeme pozorovat významnou korelaci těchto dvou hodnot. Nejvyšších hodnot dosahuje výpar v letních měsících, naopak nejnižší hodnoty výparu jsou patrné v zimních měsících.

Na výše uvedených obrázcích je možné pozorovat zvyšující se evapotranspiraci. Tento děj je možné odůvodnit zvyšující se teplotou. Toto zvýšení výparu bude mít významný vliv na bilanci povodí, a tedy i menší odtok.

3.3 Výhledová evapotranspirace

Denní hodnoty průměrné teploty vzduchu a úhrnu srážek pro období 2071-2100 byly staženy z distribučního serveru mezinárodního projektu PRUDENCE. Tento server obsahuje velké množství dat, získaných pomocí různých klimatických modelů. Pro cíle této studie jsme zvolily data stanovená regionálním klimatickým modelem RegCM pro výstupy HadAM3H A2 (pro scénář A2) a od HadAM2H B2 (pro scénář B2) – jsou uvažovány dva scénáře IPCC: A2 (ekonomicky orientovaný vývoj) a B2 (environmentálně orientovaný vývoj). Srážkové úhrny byly staženy v databázích precip.ICTP.A2.nc a precip.ICTP.B2.nc, uvedené hodnoty ($\text{kg/m}^2/\text{den}$) odpovídají jednotkám (mm/den). Průměrné teploty vzduchu (ve 2 m nad povrchem terénu) byly staženy v databázích t2m.ICTP.A2.nc a t2m.ICTP.B2.nc v jednotkách absolutní teploty (K). Vlastní analýza dat byla provedena pomocí programu Intel® Array Viewer Version 3.3 s následným zpracováním v programu Microsoft Excel. Stažená data průměrných denních teplot a srážkových úhrnů odpovídají průměrné nadmořské výšce rozlišovacího čtverce ($50 \times 50 \text{ km}$).

Na datech ze Skalnatého a Ladového plesa v období 1978–2006 byl ověřen výškový gradient srážek. Původní udávaná hodnota byla $50 \text{ mm} / 100 \text{ m}$, námi ověřená hodnota byla vyčíslena na $53 \text{ mm} / 100 \text{ m}$. Teplotní gradient je udáván $-0,6 \text{ }^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$. Tato hodnota

nebyla ověřena. Dodané hodnoty byly převedeny na výšku 2057 m n. m. Na závěr byl vyčíslen výpar podle Hamonova vzorce.

Z Obr. 18 a 19 je patrný rostoucí trend jak teploty, tak výparu. Naopak klesající trend můžeme pozorovat u hodnoty ročních srážek (Tab. 10, 11). Ovšem velmi zvláštní se zde jeví velikost hodnot. Celkový roční srážkový úhrn za předešlá období, se pohyboval okolo hodnoty 1400 mm. V období 2071–2100 je průměrný roční srážkový úhrn 1744 mm. Tato hodnota je výrazně vyšší než srážkový úhrn v předešlých letech, proto se zdá nereálná. Průměrný roční srážkový úhrn ve výšce 1180 m n. m. je 1278 mm. Tato hodnota se zdá jako pravděpodobnější, vzhledem k tomu že množství srážek by mělo být podle prognóz spíše klesající. Domníváme se, že hodnoty srážkového úhrnu dle prognózy PRUDENCE jsou nahodnocené.

V porovnání s roky 2011, 2015, 2017 a 2020 je výhledová evapotranspirace vyšší. Pro variantu A2 je výpar vyšší v průměru o 30 mm/rok, pro variantu B2, jejíž prognóza je mírnější hodnota činí 10 mm/rok (Obr. 20).

Tab. 10 Tabulka hodnot ročního výparu, průměrné teploty a ročního srážkového úhrnu, transformovaná z programu PRUDENCE, varianta A2, Ladové pleso, 2071–2100

Rok	2071	2072	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080
Výpar (mm)	279.01	282.49	276.66	270.53	286.48	275.42	285.83	265.20	252.18	270.36
prům teplota (°C)	3.28	3.43	3.15	2.82	3.68	3.05	3.64	2.52	1.77	2.77
srážkový úhrn (mm)	1722.81	1768.45	1696.36	2015.18	1858.16	2237.99	1544.34	1928.75	2007.45	1530.26

Rok	2081	2082	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090
Výpar (mm)	278.57	280.17	276.38	339.00	275.74	269.92	312.45	272.61	254.49	273.70
prům teplota (°C)	3.26	3.34	3.14	6.17	3.11	2.79	4.98	2.89	1.91	2.99
srážkový úhrn (mm)	1639.86	1352.24	1496.17	1202.84	1741.88	1998.23	1607.51	1902.78	2063.42	1696.24

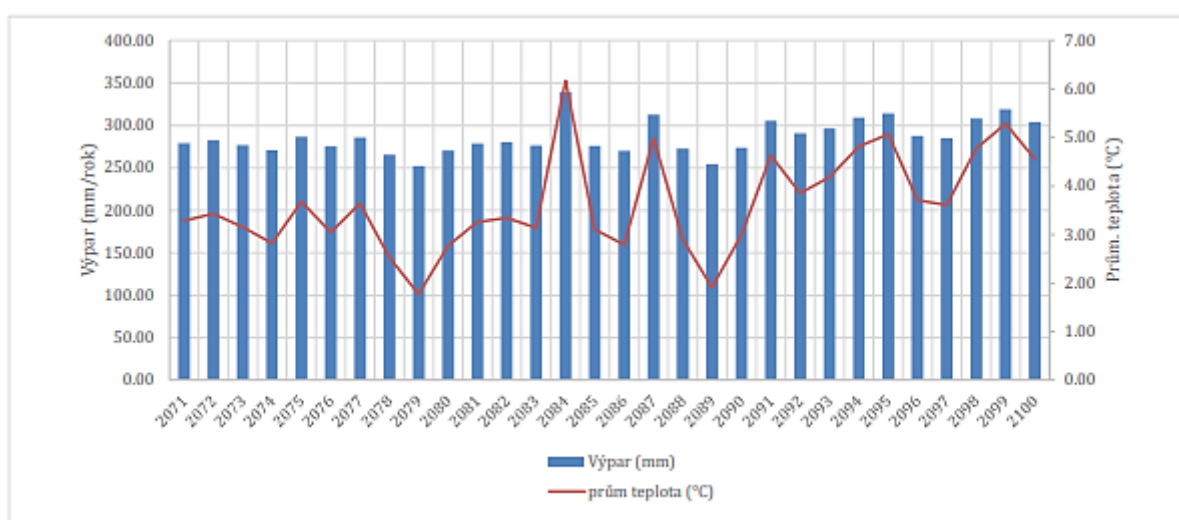
Rok	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100
Výpar (mm)	305.33	290.62	296.39	309.13	314.29	287.78	285.12	308.17	318.85	303.81
prům teplota (°C)	4.63	3.85	4.19	4.82	5.07	3.70	3.61	4.77	5.29	4.56
srážkový úhrn (mm)	1637.38	2160.54	1586.61	1445.08	1345.95	1575.82	1559.42	1870.53	1580.37	1933.73

Tab. 11 Tabulka hodnot ročního výparu, průměrné teploty a ročního srážkového úhrnu, transformovaná z programu PRUDENCE, varianta B2, Ladové pleso, 2071–2100

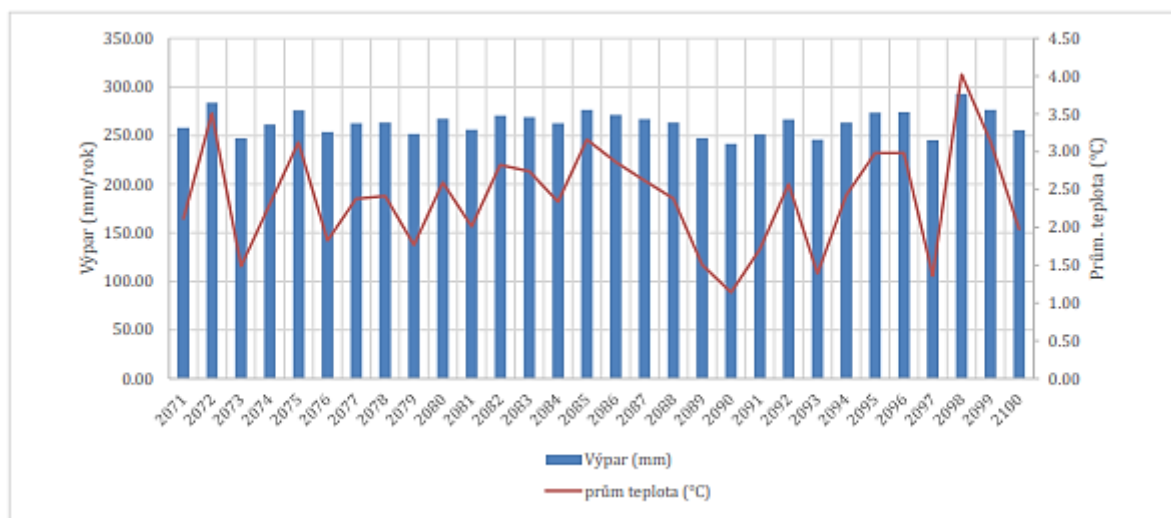
Rok	2071	2072	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080
Výpar (mm)	258.02	283.97	247.42	261.42	276.09	253.79	262.62	263.30	252.03	267.18
prům. teplota (°C)	2.11	3.50	1.49	2.31	3.12	1.83	2.38	2.42	1.77	2.59
srážkový úhrn (mm)	2300.72	1698.65	1770.33	2006.7	1912.57	1796.57	1940.63	1951.29	1720.57	1721.97

Rok	2081	2082	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090
Výpar (mm)	256.22	270.68	269.11	262.62	276.78	271.37	266.92	263.40	247.65	241.69
prům. teplota (°C)	2.01	2.83	2.74	2.34	3.16	2.87	2.62	2.38	1.50	1.14
srážkový úhrn (mm)	1934.25	1543.14	1542.9	1245.05	1672.22	1589.08	1779.32	1827.08	1547.56	1672.08

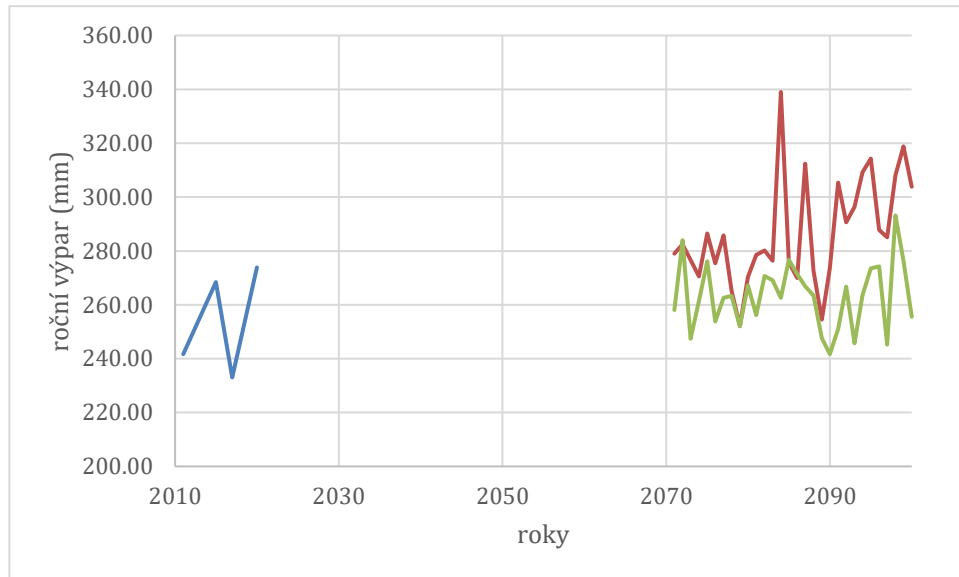
Rok	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100
Výpar (mm)	251.11	266.78	245.75	263.49	273.47	274.20	245.23	293.18	276.42	255.58
prům. teplota (°C)	1.71	2.57	1.39	2.43	2.98	2.98	1.36	4.02	3.14	1.97
srážkový úhrn (mm)	1808.72	2116.46	1892.69	1562.41	1623.57	1661.86	1977.33	1518.18	1660.16	1907.3



Obr. 18 Vývoj výparu a teploty, varianta A2, Ladové pleso, 2071-2100



Obr. 19 Vývoj výparu a teploty, varianta B2, Ladové pleso, 2071-2100



Obr. 20 Porovnání hodnot výparu pro období 2010-2020 a 2071-2100 (var. A2, B2) Ľadové pleso

3.4 Výpar z vodní hladiny,

Výpar z hladiny jezera je nezanedbatelná složka vodní bilance. Faktory, které výpar z hladiny ovlivňují, jsou podobné faktorům ovlivňující výpar z půdy. Mezi hlavní patří rozdíl napětí par, teplota vody a vzduchu, atmosférický tlak, vítr a kvalita vody (Kemel, 1996). V našem případě se zabýváme výparem z volné hladiny. V případě, že by hladina byla porostlá faunou, výpočet by se lišil. Výpar ze zarostlé hladiny je přibližně dvakrát větší než výpar z hladiny volné (Kemel, 1996).

Kvůli nedostatku dat jsme vybrali pro výpočet vztah, který vychází pouze z teploty (5). Tento vztah odvodil Šermer z výsledků měření na vodních plochách.

$$H_{vd} = 10^{(0,045 \cdot T - 0,204)} \quad (5)$$

H_{vd} střední denní hodnota výparu v měsíci [mm/den]

T střední měsíční teplota vzduchu v 2 m nad zemí [°C]

4 Geneze odtoku

Odtok vody z krajiny je složitý proces, který je ovlivněn mnoha přírodními faktory. Hlavním faktorem tvorby odtoku je srážka, její intenzita, teplota a délka trvání. Dále je odtok ovlivněn propustností půdy a jejím nasycením, typem vegetace a sklonem svahu (Pačes, 1982). Voda z povodí pouze neodtéká. Část srážky je zachycena na vegetaci (intercepce), část se vypaří a zadrží v rostlinách. Tyto složky se nepodílejí na tvorbě odtoku. Srážky odtékají povrchovým odtokem a podpovrchovým odtokem. Povrchový odtok je přímý a tvoří rychlou složku odtoku. Jedná se o srážky, které odtékají po povrchu, zpočátku nesoustředěně, později se kumulují do stroužek, bystřin, potoků a řek (Bumerl, 2003). Povrchový odtok může vzniknout třemi způsoby. Překročením infiltrační rychlosti, překročením retenční kapacity a exfilací vody v nižších částech svahu, kdy se vsáknutá voda vrací na povrch a povrchově odtéká. Podpovrchový odtok lze dělit na hypodermický a podzemní. Hypodermický odtok je proudění ve svrchní části nenasycené zóny půdního profilu a dále ho lze dělit na složku rychlou a zpožděnou. Toto dělení je ovlivněno rychlostí nasycení půdního profilu srážkou. Podzemní odtok a zpožděná složka hypodermického odtoku vytváří základní odtok (Kocum, 2012; Hubinger, 2011).

Pro porovnání vývoje geneze odtoku byla zpracována vodní bilance jezera a povodí, odtoková výška a vlhkost půdy.

4.1 Vodní bilance povodí a jezera

Vodní bilance porovnává vstupy, výstupy a změny v zásobě vody (Pažourková 2018). Bilance je počítána za určitý časový úsek, nejčastěji za hydrologický rok, tedy od 1. listopadu do 31. října následujícího roku (Kemel, 1996). Hydrologický rok je vhodný z důvodu, že srážky spadlé na podzim a v zimě ve formě sněhové pokrývky, budou počítány do roku, ve kterém odtečou z povodí.

V našem případě byla vodní bilance povodí počítána od rozvodnice povodí Ladového plesa, k uzávěrovému profilu odtoku z jezera. Vstupy bilance jsou srážky, výstupy výpar z volné hladiny a evapotranspirace. V jezeře dochází k prosakování vody do podloží, avšak tuto hodnotu jsme nebyli schopni z dostupných dat vyčíslit. K povrchovému odtoku nedochází. K zásobě vody dochází buď v jezeře, nebo ve formě sněhové pokrývky.

Pro nedostatek dat byla zvolena zjednodušená rovnice vodní bilance povodí (6).

$$P = ET \pm \Delta R \quad (6)$$

P srážky [mm]

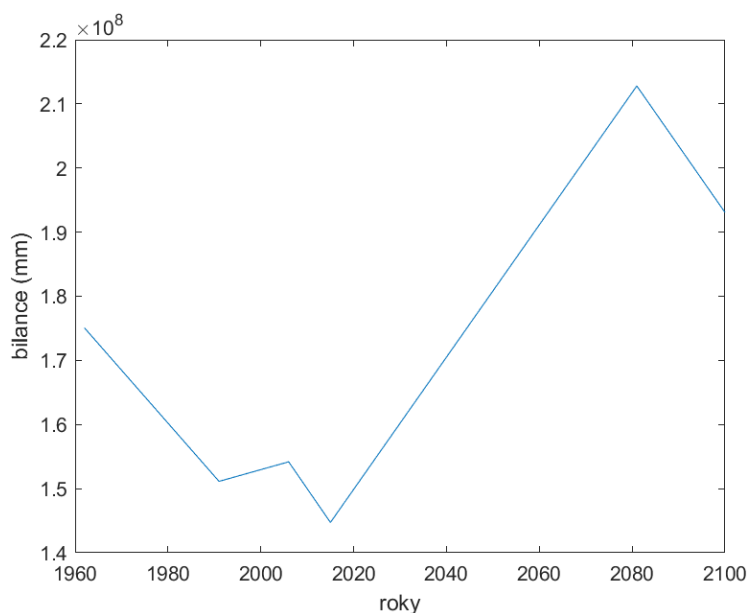
ET suma evaporace a evapotranspirace [mm]

ΔR změna zásob vody

Bilance byla počítána v ploše celého povodí, plocha, na kterou spadnou srážky se tedy rovná ploše povodí (13,8 ha). Plocha výparu z hladiny se rovná ploše jezera (1,72 ha). Evapotranspirace probíhá na zbylé ploše povodí (12,08 ha). Bilanci počítáme pro roky 1962, 1991, 2006 a pro průměrný rok za období 2010-2020, 2071-2081 a 2090-2100. Průměrný rok volíme z důvodu nedostatku dat, nebo jejich rozkolísanosti.

Tab. 12 Tabulka vodní bilance povodí, Ladové pleso, 1962–2100

	1962	1991	2006	2010-2020	2071-2081	2090-2100
P (mm)	208738800	185618280	192040800	186113700	250276800	230731860
ET (mm)	33664939	34484768	37858380	41386662	37478686	37662440
ΔR (mm)	175073861	151133512	154182420	144727038	212798114	193069420



Obr. 21 Graf vodní bilance povodí, Ladové pleso, 1962-2100

Vodní bilance jezera udává změnu objemu vody v jezeře za určitou časovou jednotku. Bilanci jezera počítáme stejně jako bilanci povodí za hydrologický rok. Pozitivní složky bilance jsou srážky spadlé na hladinu, vláha vzniklá kondenzací vodních par na hladině, přítok do jezera povrchový a podpovrchový. Záporné složky bilance jsou výpar z volné hladiny, odtok povrchový a podpovrchový (Kemel, 1996).

Zjednodušená rovnice vodní bilance jezera (7).

$$\pm\Delta R = Q + P - O - E \quad (7)$$

P srážky [mm]

Q povrchový přítok do jezera [m³/s]

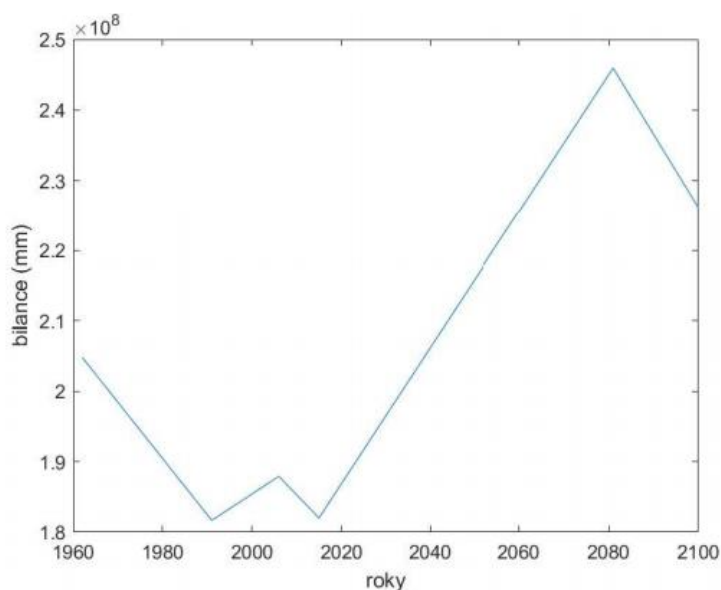
O povrchový odtok z jezera [m³/s]

E evaporace [mm]

$\pm\Delta R$ změna zásoby vody v jezeře

Tab. 13 Tabulka vodní bilance jezera, Ladové pleso, 1962–2100

	1962	1991	2006	2010-2020	2071-2081	2090-2100
P (mm)	208738800	185618280	192040800	186113700	250276800	230731860
E (mm)	3931074	3958405	4129998	4109583	4327542	4511296
Q (m³/s)	0	0	0	0	0	0
O (m³/s)	0	0	0	0	0	0
ΔR (mm)	204807726	181659875	187910802	182004117	245949258	226220564



Obr. 22 Graf vodní bilance jezera, Ladové pleso, 1962-2100

U vodní bilance jezera neuvažujeme povrchový odtok a přítok do jezera. Přítok do jezera je pouze ze srážek, odtok je díky morfologii pouze podpovrchový. Změnu v zásobě vody můžeme tedy považovat za množství vody proteklé jezerem za rok.

Hodnoty vodních bilancí, které byly počítány z naměřených dat, jsou podle očekávání klesající (Obr. 21, 22). Výhledové bilance vychází rostoucí. Tento děj je způsoben

nadhodnocenými srážkovými úhrny z programu PRUDENCE. Reálný očekávaný průběh bilance v budoucnosti je klesající. U srážkových úhrnů je předpokládán klesající trend naopak teplotní trend je rostoucí, čímž bude docházet i k vyššímu výparu a nižší hodnotě bilance. Celkové množství vody v povodí tedy bude nižší.

4.2 Odtoková výška

Odtokovou výšku můžeme definovat jako tloušťku vrstvy vody, rovnoměrně rozprostřenou na ploše povodí, která odteče za určité období (Kemel, 1996).

Rovnice odtokové výšky je definována jako (8):

$$h_o = \frac{O}{S} \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

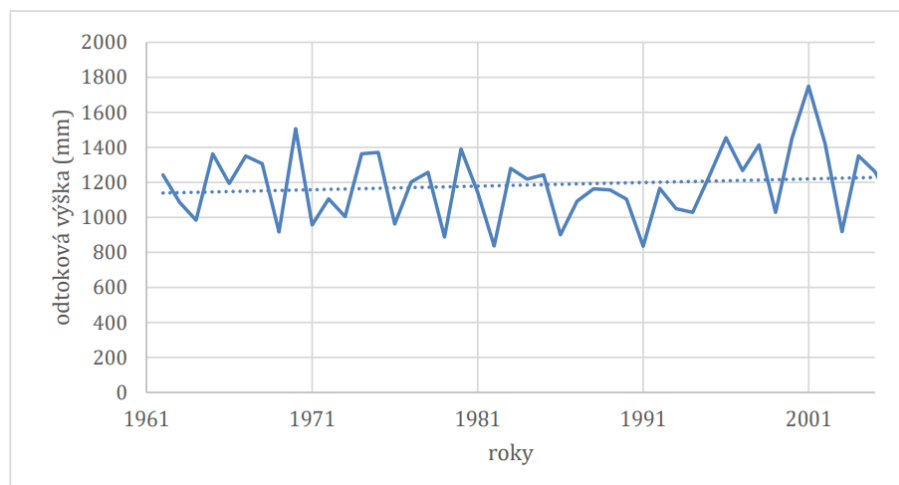
h_o odtoková výška [mm]

S plocha povodí [km²]

O odtok za jeden rok [m³]

Tab. 14 Tabulka roční odtokové výšky, Ladové pleso, 1962–2005

rok	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
h_o (mm)	1243.18	1086.61	984.629	1363.29	1193.58	1349.91	1307.37	915.977	1507.08	956.96	1105.6	1004.33	1362.62	1370.41	961.428
rok	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
h_o (mm)	1203.05	1257.8	888.083	1389.69	1143.85	837.154	1280.4	1219.66	1242.36	900.475	1092.85	1162.4	1156.13	1104.35	834.793
rok	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
h_o (mm)	1166.1	1049.62	1027.93	1237.88	1456.56	1267.5	1413.77	1028.35	1454.07	1750.15	1419.46	917.783	1351.25	1260.46	1082.37



Obr. 23 Graf roční odtokové výšky, Ladové pleso, 1962-2005

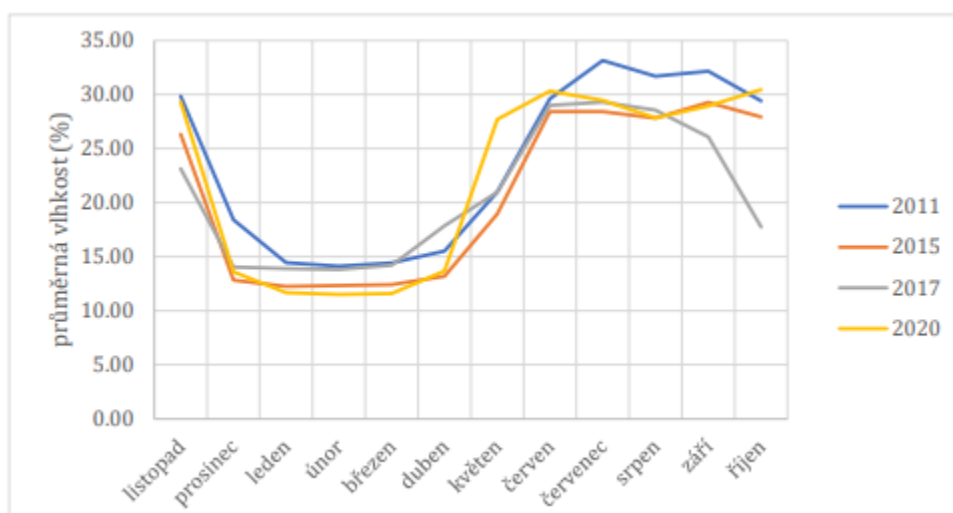
4.3 Půdní vlhkost

Půdní vlhkost je množství vody obsažené v půdě. Jedná se buď o váhový nebo objemový poměr vody ku suché složce (Kutílek, 1978). Hodnota je udávána v %. Čidlo pro měření půdní vlhkosti je v povodí Ľadového plesa umístěno v hloubce 5-10 cm. Takto měle umístěné čidlo bude významně ovlivněno teplotou vzduchu a bude rychle reagovat na srážky. Teplota bude významně ovlivňovat výpar z půdy a tato horní vrstva může rychle vysychat. Naopak při srážkové epizodě bude půda velmi rychle nasycena (Kozáková, 2015). Hodnoty mohou být z těchto důvodů extrémní. Proto byly pro porovnání zpracovány průměrné měsíční hodnoty.

Pro zadržení vody v půdě a zpomalení odtoku je významná retenční schopnost půdy, která je ovlivněna hlavně zrnitostí, strukturou a pórovitostí (Kozáková, 2015). V oblasti Ľadového plesa se nachází podzolové půdy s vysokým obsahem kamenů. Mocnost půdy se pohybuje od 0,2-0,6 m (Křeček *et al.*, 2006). Podzol je kyselá zemina, vyskytující se v horských a vysokohorských oblastech s průměrnou roční teplotou pod 5°C. Tento typ půdy má horší fyzikální vlastnosti, vodní režim je promyvný až stagnující. Promyvné půdy jsou typické převlhčením a prosakováním (Kutílek, 1978).

Tab. 15 Tabulka průměrné měsíční vlhkosti půdy v %, Ľadové pleso, 2011–2020

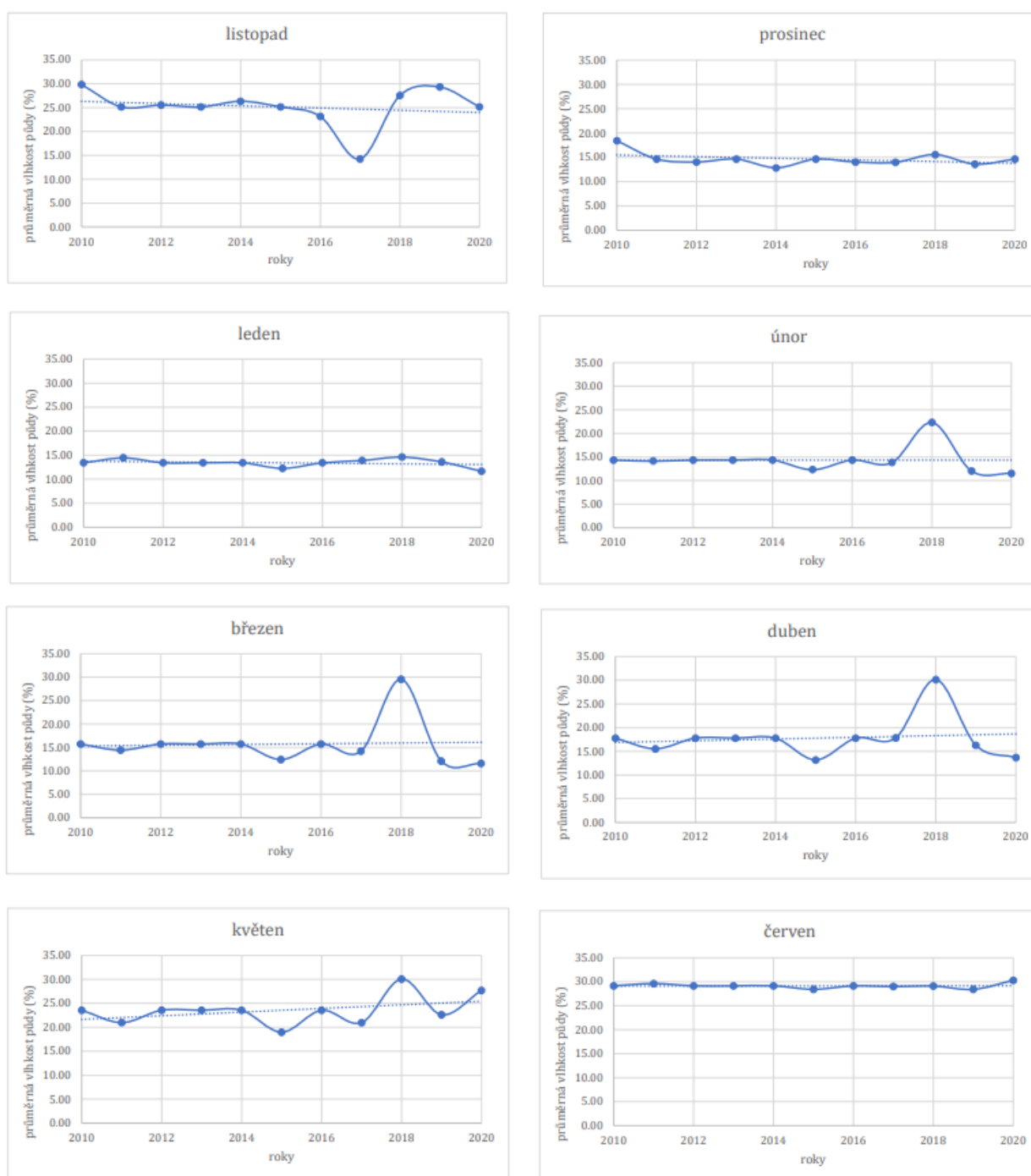
	listopad	prosinec	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen
2011	29.84	18.41	14.45	14.12	14.43	15.53	20.98	29.60	33.16	31.68	32.15	29.42
2015	26.33	12.83	12.26	12.31	12.42	13.18	18.97	28.43	28.42	27.81	29.29	27.92
2017	23.13	14.03	13.90	13.82	14.19	17.84	20.97	29.01	29.32	28.56	26.08	17.73
2020	29.32	13.59	11.65	11.51	11.59	13.68	27.70	30.30	29.45	27.84	28.94	30.46



Obr. 24 Porovnání průměrné měsíční vlhkosti půdy, Ľadové pleso, 2011-2020

Na Obr. 24 je zobrazen vývoj průměrné měsíční vlhkosti. Půda má nejvyšší vlhkost v letních měsících, kdy na povodí probíhá hlavní roční srážkový úhrn. Na jaře je patrný prudký nárůst, který je způsoben táním sněhu a jeho infiltrací. Nejnižší je půdní vlhkost v zimním období, kdy srážky spadnou ve formě sněhu.

Vlhkost půdy se za sledované období spíše nezměnila. V trendu srážek je patrný nárůst, avšak teplota se rovněž zvyšuje, čímž dochází k vyššímu výparu. Tyto změny se anulují a hodnota půdní vlhkosti zůstává konstantní.





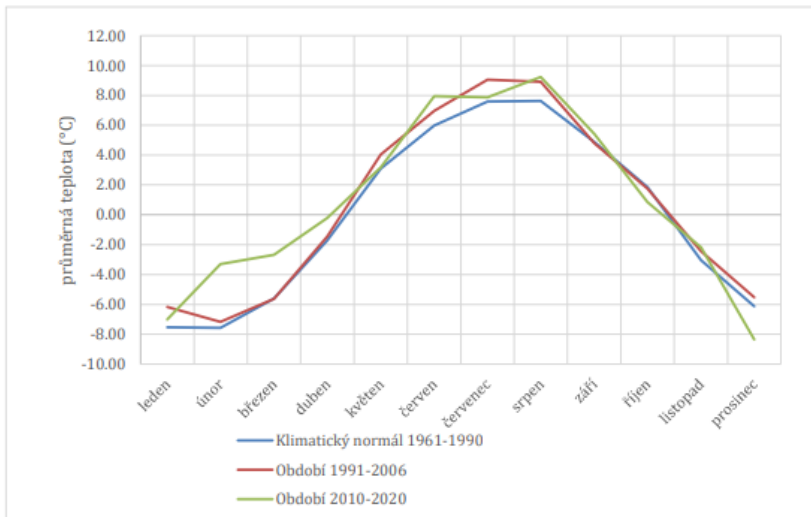
Obr. 25 Průměrná vlhkost půdy, Ladové pleso, 2010-2020

5 Zhodnocení vlivu stavu povodí a dosavadní změny klimatu na odtok

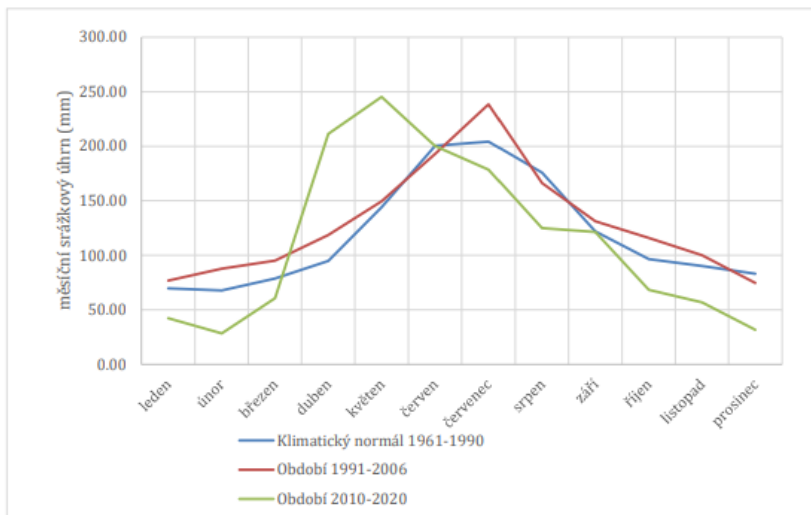
Na Obr. 26 a 27 je velmi dobře patrná dosavadní změna klimatu. Hlavní problém pozorujeme ve změně rozložení srážek. Z původního, téměř Gaussovského rozdělení srážek s vrcholem v letním období se srážky přetransformovaly do nepravidelného rozdělení s výrazným vrcholem v jarních měsících. Po zbytek roku jsou hodnoty měsíčních úhrnů nižší. Rozdělení teplot zůstává podobné, pouze teploty v jarních měsících jsou vyšší, v průměru o 2 C.

Tyto faktory mají za důsledek rychlejší a dřívější odtok z povodí. Tím, že jsou jarní teploty vyšší, je pravděpodobné, že srážky spadnou ve formě deště, na zmrzlou půdu a způsobí tím vysoký odtok z povodí. Tento odtok bude velmi rychlý a způsobí tak bleskovou povodeň, která bude mít vysokou unášecí sílu a bude degradovat tok a jeho okolí. Důsledky na povodí budou takové, že množství vody zachycené v povodí bude nižší, voda jezerem pouze proteče, protože jezero bude plné z prvního jarního tání a nebude tedy možnost, kde vodu zachytit. Důsledkem může být, že hladina vody v jezeře bude v létě výrazně klesat a v období léta, kdy by se dříve jezero plnilo, se bude dnes prázdnit.

Zvyšující teplota bude mít za následek vyšší výpar jak z vodní hladiny, tak z půdy, vodní bilance budou klesat. Růst teploty má za důsledek prodloužení vegetačního období a vyšší porost vegetací na území povodí. Tento fakt byl ověřen pomocí NDVI. Tuto změnu můžeme považovat za přínosnou, protože rostliny zlepšují kvalitu půdy, hlavně její retenční vlastnosti. Neblahý vliv na doplňování zásob vody v půdě a tím i nižší půdní vlhkost může mít snižující se množství srážek v zimním období. Je prozatím nepravděpodobné, že by tato oblast byla zasažena hydrologickým suchem, vzhledem k celkovému množství srážek, avšak měli bychom si těchto změn všimnout a snažit se jim svým chováním zabránit.



Obr. 26 Graf průměrných měsíčních teplot za období klimatického normálu 1961–1990, období 1991–2006 a období 2010–2020, Ladové pleso



Obr. 27 Graf průměrných měsíčních srážkových úhrnů za období klimatického normálu 1961–1990, období 1991–2006 a období 2010–2020, Ladové pleso

6 Závěr

Analýza dostupných dat v povodí Ladového plesa potvrdila probíhající klimatickou změnu ve vysokohorském povodí. Z provedených analýz je zřejmá změna rozložení srážek v průběhu roku, která bude mít za následek transformaci odtokového režimu. Celkový roční úhrn srážek je prozatím rostoucí, ve výhledovém období bude srážek ubývat. Srážkové úhrny pro výhledové období 2071–2100 jsou nadhodnoceny, trend je možné využít k porovnání, avšak přesné hodnoty jsou nevhodné.

Teploty jsou za sledované období rostoucí, stejně jako v období výhledovém. Výpar byl spočítán pomocí Hamonova vzorce pro období 2010–2020 a 2071–2100, opět s rostoucím trendem. Tento vzorec byl vybrán pro vhodné porovnání těchto dvou období.

Rostoucími hodnotami teploty a výparu je ovlivněna bilance povodí a jezera. Bilance je klesající pro dosavadní měření. Výhledová bilance je poznamenána chybnou hodnotou srážkového úhrnu výhledového období. Odtoková výška byla analyzována pro období 1962–2006. Její hodnoty mají díky zvyšujícím se srážkovým úhrnům mírně rostoucí trend.

Hodnoty půdní vlhkosti byly analyzovány pro období 2010–2020. Tyto hodnoty se významně nemění. To je způsobeno protichůdnými vlivy rostoucí teploty a srážek.

Na povodí byla zaznamenána zvyšující se hodnota indexu NDVI, která vyjadřuje nárůst biomasy v povodí. Tento děj je způsoben rostoucí teplotou vzduchu v průběhu celého roku, čímž dochází k prodloužení vegetačního období.

Odtok z povodí bude významně ovlivněn změnou rozložení srážek, kdy se srážkový vrchol přesunuje z letních měsíců do jarního období. Společně s rostoucí teplotou a výparem bude mít tento fakt za důsledek menší množství vody v povodí v letních měsících. Povodí není vodohospodářsky využíváno, v případě, že by tomu tak bylo, by bylo nutné uvažovat o posouzení kapacity vodní nádrže.

7 Seznam zkratk symbolů

<i>NDVI</i>	vegetační index normalizovaných rozdílů (Normalized Difference Vegetation Index)	
<i>NIR</i>	blízké infračervené záření (near-infrared radiation)	
<i>VIS</i>	viditelné záření (visible radiation)	
<i>NASA</i>	Národní úřad pro letectví a vesmír (National Aeronautics and Space Administration)	
<i>USGS</i>	Geologický průzkum Spojených států (United States Geological Survey)	
<i>RC</i>	parametr vegetace	[mm]
<i>ETP</i>	potenciální evapotranspirace dle Hamona	[mm]
<i>SMD</i>	deficit půdní vlhkosti	
<i>N</i>	maximální možná doba slunečního svitu	[hod/den]
<i>e_s</i>	napětí nasycených vodních par	[mm]
<i>T_a</i>	průměrná teplota vzduchu	[°C]
<i>P</i>	srážkový úhrn	[mm]
<i>H_{vd}</i>	střední denní hodnota výparu v měsíci	[mm/den]
<i>T</i>	střední měsíční teplota vzduchu v 2 m nad zemí	[°C]
<i>Q</i>	povrchový přítok do jezera	[m ³ /s]
<i>O</i>	povrchový odtok z jezera	[m ³ /s]
<i>E</i>	evaporace	[mm]
<i>±ΔR</i>	změna zásoby vody v jezeře	
<i>h_o</i>	odtoková výška	[mm]
<i>S</i>	plocha povodí	[km ²]
<i>O</i>	odtok za jeden rok	[m ³]

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Hypsonometrická křivka Ladového plesa (Křeček et al., 2006).....	9
Obr. 2 : Schema Ladového plesa s observací hydrometeorologických prvků (Křeček et al., 2006)....	10
Obr. 3 Graf ročních srážkových úhrnů a jejich trendy, Ladové pleso, Skalnaté pleso, 1978-2006.....	11
Obr. 4 Průměrná roční teplota vzduchu, Ladové pleso, 1961-2006.....	12
Obr. 5 Průměrné měsíční teploty, Ladové pleso, 1961-2006.....	14
Obr. 6 Porovnání průměrných, maximálních a minimálních měsíčních teplot v období klimatického normálu a sledovaného období 1991-2006, Ladové pleso	15
Obr. 7 Průměrné roční srážkové úhrny, Ladové pleso, 1961-2006.....	16
Obr. 8 Průměrné srážkové úhrny, Ladové pleso, 1961-2006	18
Obr. 9 Porovnání průměrných, maximálních a minimálních měsíčních srážkových úhrnů v období klimatického normálu a sledovaného období 1991-2006, Ladové pleso.....	19
Obr. 10 Seznam pásem používaných na družici Landsat 8, jejich vlnová délka a rozlišení (USGS) ...	20
Obr. 11 Porovnání průměrných hodnot NDVI za vegetační období z programů Landsat 5, 7, 8, povodí Ladového plesa, 1984-2020	22
Obr. 12 Porovnání maximálních hodnot NDVI z programů Landsat 5, 7, 8, povodí Ladového plesa, 1984-2020	22
Obr. 13 Porovnání mediánu NDVI za vegetační období z programů Landsat 5, 7, 8, povodí Ladového plesa, 1984-2020	23
Obr. 14 Porovnání hodnot NDVI z programů Landsat 7 a Landsat 8 na povodí Ladového plesa, rok 2019	24
Obr. 15 Porovnání hodnot NDVI z programů Landsat 5 a Landsat 7 na povodí Ladového plesa, rok 2001	24
Obr. 16 Změna potenciální evapotranspirace podle Hamona v průběhu desetiletí, Ladové pleso, 2010-2020	27
Obr. 17 Graf závislosti evapotranspirace na teplotě, průměrné hodnoty za měsíc, Ladové pleso, 2020	27
Obr. 18 Vývoj výparu a teploty, varianta A2, Ladové pleso, 2071-2100	30
Obr. 19 Vývoj výparu a teploty, varianta B2, Ladové pleso, 2071-2100	30
Obr. 20 Porovnání hodnot výparu pro období 2010-2020 a 2071-2100 (var. A2, B2) Ladové pleso	31
Obr. 21 Graf vodní bilance povodí, Ladové pleso, 1962-2100	33
Obr. 22 Graf vodní bilance jezera, Ladové pleso, 1962-2100.....	34
Obr. 23 Graf roční odtokové výšky, Ladové pleso, 1962-2005.....	35
Obr. 24 Porovnání průměrné měsíční vlhkosti půdy, Ladové pleso, 2011-2020	36
Obr. 25 Průměrná vlhkost půdy, Ladové pleso, 2010-2020	38

Obr. 26 Graf průměrných měsíčních teplot za období klimatického normálu 1961–1990. období 1991–2006 a období 2010–2020, Ladové pleso 40

Obr. 27 Graf průměrných měsíčních srážkových úhrnů za období klimatického normálu 1961–1990. období 1991–2006 a období 2010–2020, Ladové pleso 40

9 Seznam tabulek

Tab. 1 Porovnání ročních srážkových úhrnů, Ladové pleso, Skalnaté pleso, 1978-2006	11
Tab. 2 Základní charakteristiky statistického souboru dat: průměrné roční teploty vzduchu, Ladové pleso, 1961-1990	12
Tab. 3 Základní charakteristiky statistického souboru dat: průměrné roční teploty vzduchu, Ladové pleso, 1991-2006	13
Tab. 4 Porovnání průměrných, maximálních a minimálních měsíčních teplot, Ladové pleso, 1991-2006	15
Tab. 5 Základní charakteristiky statistického souboru dat: průměrné roční teploty vzduchu, Ladové pleso, 1961-1990	16
Tab. 6 Základní charakteristiky statistického souboru dat: průměrné roční teploty vzduchu, Ladové pleso, 1991-2006	17
Tab. 7 Porovnání průměrných, maximálních a minimálních měsíčních teplot, Ladové pleso, 1991-2006	19
Tab. 8 Potenciální evapotranspirace podle Hamona pro jednotlivé měsíce, Ladové pleso, 2010-2020	27
Tab. 9 Aktuální evapotranspirace pro jednotlivé měsíce, Ladové pleso, 2010-2020	28
Tab. 10 Tabulka hodnot ročního výparu, průměrné teploty a ročního srážkového úhrnu, transformovaná z programu PRUDENCE, varianta A2, Ladové pleso, 2071-2100	29
Tab. 11 Tabulka hodnot ročního výparu, průměrné teploty a ročního srážkového úhrnu, transformovaná z programu PRUDENCE, varianta B2, Ladové pleso, 2071-21008	30
Tab. 12 Tabulka vodní bilance povodí, Ladové pleso, 1962-2100	33
Tab. 13 Tabulka vodní bilance jezera, Ladové pleso, 1962-2100	34
Tab. 14 Tabulka roční odtokové výšky, Ladové pleso, 1962-2005	35
Tab. 15 Tabulka průměrné měsíční vlhkosti půdy v %, Ladové pleso, 2011-2020	36

10 Seznam literatury

- [1] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [2] Baláž, E. (2010). Tatry: příroda. Praha: Baset.
- [3] Bumerl, M. (2003). Hydrologie. Veselí nad Lužnicí. 56 s
- [4] De Jong, C., Collins, D. N., & Ranzi, R. (Eds.). (2005). Climate and hydrology of mountain areas. John Wiley & Sons.
- [5] Holtmeier, F.K. (1973). Geocological Aspects of Timberlines in Northern and Central Europe. Arctic and Alpine Research 5(3): A45-A54.
- [6] Hubinger, L. (2011). Hypodermický a drenážní odtok. Praha, Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav hydrogeologie, inž. geologie a užitá geofyziky. Vedoucí práce Datel, Josef.
- [7] IPCC (2013). Climate change 2013: The physical science basis. The fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO, Geneva
- [8] Kemel, M. (1996). Klimatologie, meteorologie, hydrologie. ČVUT.
- [9] Kocum, J. (2012). Tvorba odtoku a jeho dynamika v pramenné oblasti Otavy. Dizertační práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie. Vedoucí práce Janský, Bohumír.
- [10] Kofroňová, J. (2014): Význam evapotranspirace v hydrologické bilanci malého povodí. Bakalářská práce, Přírodovědecká fakulta, UK v Praze, 47 s.
- [11] Kozáková, J. (2015). Variabilita hydroopedologických charakteristik v modelových povodích v pramenné oblasti Blanice. Praha. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie. Vedoucí práce Kliment, Zdeněk.
- [12] Kunský, J. (1974). Československo fyzicky zeměpisně. SPN Praha, 251 s.
- [13] Kutílek, M. (1978). Vodohospodářská pedologie: vysokoškolská učebnice. Praha: SNTL. s. 112. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:cddabc80-ab95-11e6-8bf1-001018b5eb5c>

-
- [14] Lacika, J., Kollár, D., Pacola, A., & Bohuš, I. (2007). Vysoké Tatry. Akcent.
- [15] Messerli, B., Viviroli, D., Weingartner, R., (2004). Mountains of the world: vulnerable water towers for the 21st century. *AMBIO Spec. Rep.* 13, 29–34.
- [16] Midriak, R. (2001). Recentná a súčasná morfogénéza reliéfu supramontánneho, subalpínskeho a alpínskeho stupňa Tatier (Slovensko). *Geomorphologia Slovaca*, 1(1):74-77.
- [17] Novák, M. (2004) Meteorologie a ochrana prostředí: úvod do meteorologie a klimatologie. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Fakulta životního prostředí.
- [18] Pačes, T. (1982). Voda a Země, Praha: Academia.
- [19] Pažourková, E. (2018). Vodní bilance subalpínského povodí: Missiaga (Dolomity, Itálie).
- [20] Roy, D. P., et al. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote sensing of Environment*, 185: 57-70.
- [21] Shaw, E. M., et al. (2011). Hydrology in practice. CRC press.
- [22] Winterberg, S., Willett, S.D. (2019). Greater Alpine river network evolution, interpretations based on novel drainage analysis. *Swiss Journal of Geosciences* 112: 3–22
- [23] WMO. (2001). Technology for Detecting Trends and Changes in Time Series of Hydrological and Meteorological Variables. Hydrological Operational Multipurpose System, World Meteorological Organization, Genève, 28 s.

Elektronické zdroje:

- [24] NASA. Measuring Vegetation (NDVI & EVI). Earth observatory [online]. 2000, 30 August 2020n. l. [cit. 2021-4-11]. Dostupné z: https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php
- [25] gisat. Landsat [online]. [cit. 2021-4-14]. Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/landsat>;

- [26] Google. USGS Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1. Earth Engine Data Catalog [online]. [cit. 2021-4-14]. Dostupné z: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_SR?hl=en#description
- [27] USGS. What are the band designations for the Landsat satellites? USGS science for changing world [online]. [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_SR?hl=en#description
- [28] The COMET® Program. Hydrologie sněhu: Odtok vody z tání sněhu: Vliv stavu půdy. Snowmelt processes [online]. 2011 [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/snowmelt/index.htm>
- [29] USGS. Landsat Surface Reflectance Quality Assessment. USGS science for changing world [online]. [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-surface-reflectance-quality-assessment?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con