

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Aplikovaná Geografie
Studijní specializace: Fyzická geografie a geoinformatika



Michaela Slaninová

**Sezónní tání na vybraných sněžnicích v severní části ostrova
Jamese Rosse**

Seasonal melting at selected snow patches in the northern part of
Jamese Ross Island

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Zbyněk Engel, Ph.D.

Praha, 2025

Zadání bakalářské práce

Téma práce

Sezónní tání na vybraných sněžnících v severní části ostrova Jamese Rosse

Motivace

Polární oblasti, a především Antarktida, představují regiony velmi citlivé na probíhající klimatickou změnu. V rámci Antarktidy zaujímá v tomto ohledu mimořádné postavení severní část Antarktického poloostrova, kde se změna klimatických podmínek projevuje rozpadem šelfových ledovců, úbytkem hmoty ledovců a nárůstem mocnosti činné vrstvy. Dopady na sněhovou pokrývku, nejcitlivější složku kryosféry, zůstávají z velké části neznámé. Předpokládaný nárůst teploty vzduchu pravděpodobně zvýší intenzitu srážek, ale jejich dopady na rozšíření a tání sněhové pokrývky zůstávají z velké části neznámé.

Cíle práce

Cílem práce je vyhodnocení změn výšky sněhu na povrchu sněžníků a posouzení stanovištních podmínek tání na základě terénních dat z období 2020/21. Změny výšky sněhu budou hodnoceny z časosběrných snímků fotopastí a charakteristiky teploty vzduchu budou odvozeny ze záznamů automatických meteorologických stanic.

Metody, zájmové území a zdroje dat

První část práce bude věnována rešerši odborné literatury zaměřené na ablaci ledovců v okrajové části Antarktidy, fyzickogeografické podmínky zájmové oblasti a faktory, které ovlivňují proces ablace. Praktická část bude zahrnovat vyhodnocení změn výšky sněhu na povrchu dvou sněžníků v severní části ostrova Jamese Rosse a to na severním úbočí plošiny Johnson Mesa a v erozním zářezu na dolním toku Algal. Změny povrchu sněžníků budou odečteny z ablačních tyčí na časosběrných snímcích a konfrontovány se záznamy teplot vzduchu z obou lokalit. Navíc budou pro přehled území v prostředí ArcGIS Pro vytvořeny mapy z poskytnutých dat od České geologické služby.

Datum zadání: 7. 1. 2025

Jméno studenta: Michaela Slaninová

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: doc. RNDr. Zbyněk Engel, Ph.D.

Podpis vedoucího práce:

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovávala samostatně a že jsem v práci uvedla všechny použité zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla využita k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Ve Vlašimi, 30. 4. 2025

.....

Michaela Slaninová

Poděkování

Prvně bych ráda poděkovala mému vedoucímu práce doc. RNDr. Zbyňkovi Engelovi, Ph.D za velikou ochotu, užitečné rady i zpětnou vazbu k mé odvedené práci. Velké poděkování mu patří za jeho čas, který investoval do konzultací a poskytování dat. Zároveň bych chtěla poděkovat panu doc. Mgr. Kamilovi Láskovi, Ph.D a panu Mgr. Filipovi Hrbáčkovi, Ph.D za naměřená a zpracovaná data, jež sloužila k vyhotovení této práce. Děkuji také svým blízkým za jejich podporu během studia.

Abstrakt

Polární oblasti a zvláště oblast Antarktického poloostrova je jednou z velmi citlivých oblastí na probíhající klimatickou změnu. Narůstající teploty vzduchu, které dominovaly v 2.polovině 20.století, ovlivňují výšku a vlastnosti sněhové pokrývky, která je stěžejní pro vývoj ledovců a bilanci hmoty ledovců. Ostrov Jamese Rosse, který je ve středu zájmu této práce, se nachází na východě Antarktického poloostrova, kde panují zcela odlišné podmínky než na západě poloostrova.

V této studii byla v kontextu vývoje teplot vzduchu v období od ledna do dubna 2021 posuzována ablace na dvou sněžnicích na poloostrově Ulu v severní části ostrova Jamese Rosse. K vyhodnocení změny výšky povrchu byly využity ablační tyče. Jedním z cílů bylo zhodnotit vztah ablace s teplotními daty, přičemž provedená analýza prokázala, že měnící se teploty z části ovlivňují procesy tání. Dle koeficientů determinace variabilitu změny výšky povrchu a konkrétně ablaci nejlépe vysvětluje proměnná maximální denní teploty. Spearmanův korelační koeficient ukázal nejsilnější vztah mezi průměrnou denní teplotou a změnou výšky povrchu. Na základě záznamů z automatických meteorologických stanic byl dále zhodnocen vývoj teplot v zájmových oblastech ablační sezóny 2020/21. Zájmové lokality sněžníků byly porovnány z hlediska dynamiky procesů ablace a akumulace s ledovcovou čapkou Davies Dome, která vykazovala stabilnější podmínky. Analýza a rešerše odborné literatury byla dále rozšířena o mapy znázorňující studované oblasti. Práce byla vypracována pro lepší pochopení dopadů teploty na úbytek sněhové pokrývky, která je v polárních oblastech pro vývoj ledovců nezbytná.

Klíčová slova: Antarktický poloostrov, ostrov Jamese Rosse, ablace, akumulace, sněhová pokrývky, sněžník

Abstract

Polar regions, and especially the Antarctic Peninsula, are among the most sensitive regions to the ongoing climate change. Rising air temperatures, which dominated in the second half of the 20th century, affect the height and properties of the snow cover, which is crucial for glacier development and the glacier mass balance. James Ross Island, the focus of this study, is located in the eastern part of the Antarctic Peninsula, where the conditions are entirely different from those in the western part of the peninsula.

In this study, the ablation of these two snow patches on the Ulu Peninsula in the northern part of James Ross Island was assessed in the context of the air temperature trend from January to April 2021. Ablation stakes were used to evaluate the change in the snow surface. One of the objectives was to evaluate the connections between ablation and temperature data. The analysis showed that changing air temperatures partly influence melting processes. According to the coefficients of determination, the variability in surface height change, and specifically ablation, is best explained by the variable of maximum daily temperature. Spearman's correlation coefficient revealed the strongest relationship between average daily temperature and surface height change. Based on records from automatic weather stations, the temperature trends were evaluated in the areas of interest for the 2020/21 ablation season. The snow patches were compared with Davies Dome ice cap in terms of the ablation dynamics and accumulation processes. Results showed that Davies Dome is more stable than the snow patches in this study. The analysis and literature review were further supplemented with maps illustrating the studied areas. This work was developed to better understand the impacts of temperature on the melting snow cover, which is important for glacier development in polar regions.

Keywords: Antarctic Peninsula, James Ross Island, ablation, accumulation, snow cover, snow patch

OBSAH

1 ÚVOD	10
1.1 Tání v polárních oblastech	10
1.2 Cíle práce	10
2 ABLACE V OKRAJOVÉ ČÁSTI ANTARKTIDY	11
2.1 Ablace.....	11
2.2 Faktory ovlivňující ablací	11
2.3 Ablace ledovců na sub/antarktických ostrovech	13
2.4 Vývoj teplotních podmínek na ostrově Jamese Rosse	16
3 FYZICKOGEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉ OBLASTI	17
3.1 Ostrov Jamese Rosse	17
3.2 Klimatická charakteristika	20
3.3 Geologická charakteristika	21
3.4 Geomorfologická charakteristika	21
3.5 Hydrologická charakteristika	22
4 METODIKA	24
4.1 Použitá data	24
4.1.1 Ablace.....	24
4.1.2 Teplota vzduchu.....	24
4.1.3 Výška sněhu na lokalitě Davies Dome	25
4.1.4 Data pro tvorbu map	26
4.2 Zpracování dat	27
5 VÝSLEDKY	30
5.1 Ablace na zájmových lokalitách.....	30
5.2 Vztah ablace a teploty vzduchu.....	31
5.3 Ablace na lokalitě Davies Dome	36
5.4 Abláční sezóna 2020/21	37

5.5 Fáze akumulace	40
6 DISKUSE	43
6.1 Faktory ovlivňující přesnost měření a zpracování dat	43
6.2 Abláční sezóna	43
6.3 Vztah teploty a tání	45
7 ZÁVĚR.....	46
8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	48
Knihy a články	48
Konferenční abstrakty	53
Mapy a atlasy	53
SEZNAM OBRÁZKŮ	54
SEZNAM TABULEK.....	55
SEZNAM ZKRATEK.....	55

1 ÚVOD

1.1 Tání v polárních oblastech

Tato práce je zaměřena na pozorování ablace sněžníků v severní části ostrova Jamese Rosse, který se nachází východně od Antarktického poloostrova. Konkrétně se jedná o lokalitu svahové deprese v severním úbočí plošiny Johnson Mesa a lokalitu erozní rýhy na dolním toku Algal. Ledovce zde, stejně jako jinde v polárních oblastech, hrají důležitou roli jak v rámci lokálních i globálních ekosystémů (Sziło, Bialik 2018) tak i v hydrologických cyklech, což je dalším nemalým důvodem, proč je důležité toto ledovcové prostředí zkoumat.

Ledovce jakožto velké dynamické systémy se specifickou strukturou vznikají přeměnou sněhu v ledovcový led (Dziembowski, Bialik 2022) pomocí procesů regulace a dynamické metamorfózy. Citlivě reagují na změnu klimatu a neustále mění svůj objem v závislosti na změnách teplot, množství srážek a dalších faktorech (Benn, Evans 2010). Protože většina ledovců je soustředěna právě v polárních oblastech, jsou tyto oblasti a zejména Antarktický poloostrov, který je dle studie Abrama et al. (2013) obzvláště citlivý na tání a úbytek ledovcové hmoty i při relativně malém nárůstu teploty, stěžejním místem pro výzkum změn ledovců a jejich reakcí na měnící se klima. Navzdory velkému rozsahu ledovců v Antarktidě a její okrajové části pro tuto oblast existuje pouze málo studií s vypovídajícími údaji o změnách tohoto prostředí, které jsou stěžejní mimo již zmíněné i k rekonstrukci vzestupu hladiny oceánů (Engel et al. 2018).

1.2 Cíle práce

Předložená práce zahrnuje rešerši odborné literatury na téma ablace ledovců a fyzickogeografické charakteristiky, která předchází praktické části. Hlavní cíle zahrnují vyhodnocení změn výšky sněhu z ablačních tyčí na povrchu sněžníků dvou vybraných lokalit a následné posouzení stanovištních podmínek tání na základě terénních dat z období 2020/21. Stanovištními podmínkami se rozumí záznamy teplot na dvou stanovištích z automatických meteorologických stanic.

2 ABLACE V OKRAJOVÉ ČÁSTI ANTARKTIDY

2.1 Ablace

Ablace ledovců, projevující se ztrátou ledovcové hmoty, vypovídá o dynamice ledovcového prostředí a zahrnuje procesy tání, evaporace, sublimace, větrné eroze a telení ledovcových bloků do vodního prostředí (Benn, Evans 2010), které na led působí velice dynamicky. Podle Benn a Evans (2010) u ledovců končících na pevnině převažuje zejména tání, přičemž sublimace hraje velikou roli pouze v suchém a chladném prostředí a vyžaduje spolu s evaporací mnohem více energie.

Na většině ledovců středních a vysokých zeměpisných šířek (Seibert et al. 2015), lze vymezit horní zónu, kde akumulace převyšuje ablací a dolní zónu, kde naopak ablace převládá nad akumulací (Benn, Evans 2010). Ledovce tak akumulují většinu srážek v zimě a část z akumulované hmoty následně ztrácejí ablací během letních měsíců (Seibert et al. 2015). Rozdíl mezi úbytkem hmoty a množstvím nově nahromaděného materiálu procesem akumulace se nazývá bilance hmotnosti ledovce. Právě úbytek ledovcové hmoty je často spojován s narůstající teplotou vzduchu a může tak sloužit jako jeden z ukazatelů změny klimatu (Pętllicki et al. 2017) a být tak zásadní pro její rekonstrukci a predikci do budoucna (Dziembowski, Bialik 2022).

Bilanci ledovcové hmoty lze dle Zempa et al. (2013) měřit metodou glaciologickou, která je založena na měření in situ, kdy se přímo v terénu měří změna povrchu ledovce v určitém bodě pomocí ablačních tyčí a metodou geologickou – mapováním ledovcového povrchu pomocí satelitních snímků, laserového skenování či například fotogrammetrie.

2.2 Faktory ovlivňující ablací

Hlavním faktorem, jenž předchází procesu ablace je přínos sněhových srážek a jejich ukládání v podobě sněhové pokrývky. Následný proces ablace je typický pro měsíce s intenzivnějším slunečním zářením a nejvyššími teplotami vzduchu (Seibert et al. 2015). Sněhová pokrývky, jak uvádí Cohen (2008), má na teplotu povrchu vliv i z hlediska tepelné izolace a toku latentního tepla, spotřebovaného v rámci fázových přeměn vody.

Dle Jordan et al. (2008) změny teploty vzduchu a slunečního záření ovlivňují jak tání sněhu tak i teplotu uvnitř sněhové pokrývky. V závislosti na teplotním gradientu uvnitř sněhu dochází k růstu velikosti sněhových zrn, které snižují albedo a vedou tak k intenzivnější absorpci tepla povrchem Země, přičemž v návaznosti na to tak dochází k odtávání sněhové pokrývky. Také faktory jako sklon a orientace svahu mohou výrazně ovlivňovat množství přicházejícího slunečního záření, které je jedním z určujících faktorů tání sněhové pokrývky.

Oblasti pokryté sněhem se obecně vyznačují vysokým albedem, tj. vlastností odrazet část dopadajících slunečních paprsků zpět do atmosféry. Tato odrazivost dle Armstronga a Rosse (2008) způsobuje pozitivní zpětnou vazbu, kdy narůstající teplota vzduchu vede k tání sněhové pokrývky, snížení hodnoty albeda a tím k větší absorpci záření a následnému oteplení vzduchu. Odrazivost se liší v závislosti na stáří sněhu (Obr. 1), přičemž u nového sněhu dosahuje hodnot 0,9, s narůstajícím stářím klesá a v oblastech bez sněhové pokrývky se přibližuje hodnotám od 0,1 po 0,3 (Seibert et al. 2015).

Fresh, dry snow	0.80–0.95
Old, dry snow	0.70–0.80
Wet snow	0.50–0.70
Melting ice/snow	0.25–0.80
Snow-covered forest	0.25–0.40
Snow-free vegetation/soil	0.10–0.30
Water (high solar elevation)	0.05–0.10

Obr. 1: Typické rozmezí hodnot povrchového albeda (zdroj: Armstrong a Ross, 2008, s.5)

Mezi atmosférou, sněhem a povrchem probíhají tepelné toky, se kterými počítá energetická bilance sněhové pokrývky a tu lze vyjádřit následujícím vzorcem,

$$Q_m = Q_{ns} + Q_{nl} + Q_h + Q_e + Q_p + Q_g + Q_i$$

kde Q_m vyjadřuje celkový tok tepla pro tání sněhu, Q_{ns} tok tepla krátkovlnného záření, Q_{nl} tok dlouhovlnného záření, Q_h tok zjevného tepla, Q_e tok latentního tepla vlivem fázových přeměn, Q_p tok ze srážek, Q_g teplo z půdy a Q_i změnu vnitřní energie sněhové pokrývky (Seibert et al. 2015). Dle Kinga et al. (2008) závisí toky na rozhraní sněhové pokrývky a atmosféry mimo jiné na topografii povrchu, albedu či schopnosti sněhu vést teplo. Lze tedy říct, že tyto toky za určitých podmínek ovlivňují jak fázi akumulace tak fázi ablace. Szafraniec (2002), který se věnoval vztahu

povrchové ablace se sumy pozitivních denní stupňů a také s délkou slunečního svitu, ve své práci uvádí, že velká část energie, která způsobuje tání pochází ze slunečního záření a zjevného tepla.

Významnou roli při procesu tání také hrají turbulentní toky sněhu způsobené větrem, který může v rámci překážek větších měřítek tvořit v jejich závětrí sněhové závěje (King et al. 2008).

Konkrétně na ostrově Jamese Rosse se převládajícími jižními a jihozápadními větry do závětrných míst dostává sníh z ledových příkrovů (Zvěřina et al. 2014), kde se poté větší sněhové akumulace časem změní ve firn a následně v led. V důsledku rychlosti větru dochází k přeměně sněhových krystalů, které se zmenšují, mění svůj tvar a zvyšují tak hustotu sněhu (Jordan et al. 2008). Podle Engela et al. (2012) období tání sněhové pokrývky na ostrově Jamese Rosse začíná počátkem listopadu a trvá zhruba do konce února. Míra ablace může být v zájmových oblastech této práce také ovlivněna nadmořskou výškou míst, kde se sněžníky vyskytují, neboť zde panují odlišné klimatické podmínky.

2.3 Ablace ledovců na sub/antarktických ostrovech

Studium tání ledovců v oblasti Antarktického poloostrova je klíčové z několika důvodů. Tato oblast citlivě reaguje na změny teplot, což se může projevat táním a úbytkem ledovcové hmoty (Abram et al. 2013). Dle Turnera et al. (2005) převážně západní strana poloostrova podléhá výraznému oteplování, které vede k těmto reakcím.

Mezi západním a východním pobřežím poloostrova lze pozorovat výrazné klimatické rozdíly. Východní pobřeží Antarktického poloostrova je převážně ovlivněno studenými a suchými vzduchovými masami pocházejícími z přilehlého Weddellova moře, zatímco západní pobřeží je vystaveno vlhkým a relativně teplým vzduchovým masám z jižního Tichého oceánu, nesenými silnými západními větry (Falk et al. 2018). Za posledních šest desetiletí zaznamenala oblast západního pobřeží poloostrova výrazný nárůst teploty vzduchu až o 3 °C, což odpovídá nárůstu 0,5 °C za dekádu, přičemž největší oteplování nastalo v období 1980–89 a 1990–99 (Engel et al. 2024; Turner et al. 2005).

Existuje několik studií zabývajících se ablací právě v okrajových částech Antarktidy, zahrnující Antarktický poloostrov. Jedním z klíčových míst pro studium ablace v západní části Antarktického poloostrova je ostrov King George Island, součást Jižních Shetland, kde výzkum probíhá již od 50. let 20. století (Dziembowski, Bialik 2022). Dziembowski (2022) uvádí, že vlivem subpolárního a oceánského klimatu je toto území více náchylné vůči klimatické změně než kontinentální část Antarktidy. S tímto také korelují výsledky Knapa et al. (1996), které naznačují, že ledovcové čepice ostrova King George Island a možná i celé severní části Antarktického poloostrova velmi rychle reagují na zvyšující se teploty. Výzkum se konkrétně zaměřil na ledovce Ecology a Baranowski, u kterých došlo ke ztrátám hmoty v reakci na rostoucí teplotu vzduchu. Tyto ztráty byly vyhodnoceny pomocí ablačních tyčí a satelitních snímků. Konkrétně mezi roky 2012–2016, Petlicki et al. (2017) stanovil změnu výšky ledovce Ecology o $-0,5 \pm 0,6$ m/rok. Naproti tomu mezi roky 1979–2001 byla vypočtena změna až o $-1,7 \pm 0,4$ m/rok. Braun a Hock (2004) uvádí, že model tání, který byl ve výzkumu na ostrově King George použit, ukazuje, že zvýšení teploty o 1 až 2 °C vedlo ke zvýšení průměrné ablace o 27 %, respektive 62 %, což poukazuje na vysokou citlivost ledovcové čepice ostrova King George Island na potenciální budoucí oteplování.

Kergueleny, ostrovy v jižní části Indického oceánu, jsou dalším významným místem pro studium ablace. V 60. a na počátku 70. let zde byl pozorován ustupující ledovec Ampère, vyústění Cookovy ledovcové čepice (Berthier et al. 2009). V novějších pracích byla věnována pozornost i jiným ledovcům jako je Rallier du Baty Peninsula a Mount Ross, za použití mapy z roku 1963 a satelitních snímků. Kromě plošných změn zde byly vyhodnoceny změny nadmořské výšky ledovců a míra ztenčování ledu. V kontextu klimatické změny studie Berthiera et al. (2009) poukazuje na zrychlený ústup ledovců od 90. let, což naznačuje, že tyto ledovce aktivně reagují na měnící se klimatické podmínky. Zajímavá je zde asymetrie ztenčování ledovce, kdy k největším ztrátám došlo na západní návětrné straně, která se nachází v nižší nadmořské výšce.

Začátkem 21. století probíhala také studie změny nadmořské výšky a hmoty ledovců na Jižní Georgii, největším ze subantarktických ostrovů. Místní orografické bariéry a silné západní větry vedly k rychlejšímu ústupu ledovců na severovýchodním pobřeží (Farías-Barahona et al. 2020). Na severovýchodě ostrova došlo k největším

úbytkům tloušťky ledovců s průměrnou změnou výšky $-1,76 \pm 0,01$ m/rok. Naopak na jihozápadě ostrova byla průměrná změna výšky nižší a činila $-0,69 \pm 0,01$ m/rok. Celková ztráta hmoty na Jižní Georgii byla mezi léty 2000–2013 odhadnuta na $-2,28 \pm 0,19$ Gt za rok. Přestože u tohoto výzkumu chybí přímé srovnání s jinými výpočty v této oblasti, jsou výsledky v souladu se studiiemi na jiných lokalitách jižní polokoule (Farías-Barahona et al. 2020).

Engel, Nývlt a Láska (2012) se ve výzkumu zaměřovali na změnu nadmořské výšky ledovců na ostrově Jamese Rosse a to konkrétně na ledovcovou čepku Davies Dome a údolní ledovec Whiskey Glacier mezi lety 1979–2006. Změny v rámci těchto ledovců byly odvozovány z leteckých snímků, digitálních modelů a nemalá část byla prováděna přímo v terénu pomocí pozemního radaru. Dle výsledků za dané období došlo k poklesu nadmořské výšky u ledovce Davies Dome o $8,5 \pm 2,8$ m. Maximální tloušťky ledu změřené radarem dosáhly v průměru 83 ± 2 m pro ledovec DD a 158 ± 2 m pro Whiskey Glacier.

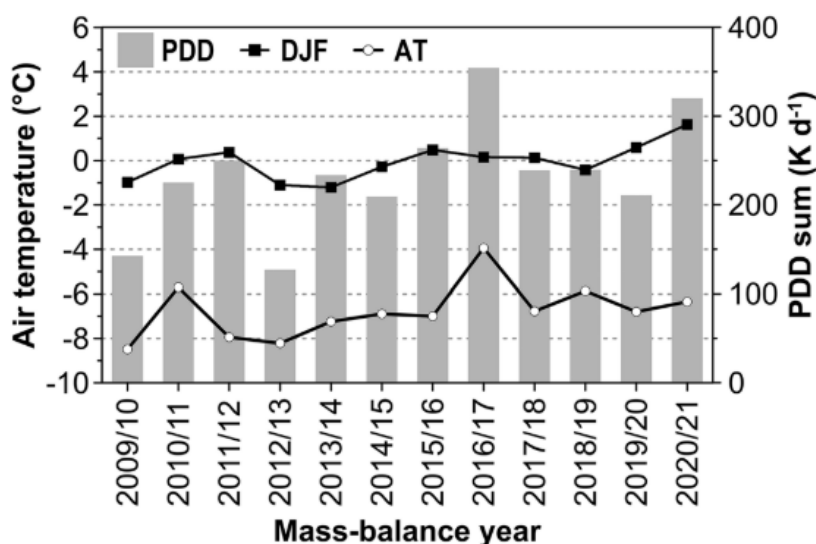
Změnám hmotnostní bilance se na ostrově Jamese Rosse věnoval Engel et al. (2018) a to opět ledovcům Davies Dome a Whiskey Glacier, které v období 2009–15 přirůstaly a jejich hmotnostní bilance se dostala až k pozitivním hodnotám. V roce 2011/12 naopak ledovce hmotu ztrácely a to v rámci obou zkoumaných ledovců. Obecně za období 2009–15 v porovnání s Whiskey Glacier došlo u ledovce Davies Dome k třikrát nižšímu přírůstku hmoty vysvětlovaným dle studie větrnou redistribucí sněhu v tomto typu reliéfu. Terénní výzkum byl zaměřen na sledování výšky ledu pomocí ablačních tyčí, které bývají navrtávány 1–1,2 m do ledu (Engel et al. 2018) a ze kterých pak lze stanovit hodnotu hmotnostní bilance ledovců.

V letech 2009–2011 byla zaznamenána vysoká sezónní a mezidenní proměnlivost dopadajícího slunečního záření a teploty vzduchu, což mohlo tání ledovců na ostrově Jamese Rosse značně ovlivnit (Láska et al. 2012). Nejvyšší míry akumulace i ablace byly pozorovány na jaře a v létě (říjen–únor), zatímco v zimě (květen–září) byly změny zanedbatelné. Zaznamenané teploty byly v práci Lásky et al. (2012) dány do kontextu s povrchovou ablací pomocí lineární regrese.

2.4 Vývoj teplotních podmínek na ostrově Jamese Rosse

Jak již bylo uvedeno, oblast Antarktického poloostrova si prošla v druhé polovině 20. století výrazným oteplením a patřila k jednému z nejrychleji se oteplujících míst jižní polokoule (Turner et al. 2005). Tento jev se týkal zejména západní části poloostrova a dle (Ambrožová, Láska 2016) mají již teploty klesající trend.

Na ostrově Jamese Rosse docházelo v období 2005–2015 k poklesu teplot dosahujících 1,5 °C/10 let. U většiny stanic Antarktického poloostrova docházelo k největšímu poklesu na jaře a v létě. Na ostrově Jamese Rosse na vrcholu Bibby Hill, došlo k největšímu poklesu během jara až o 4 °C/10 let (Ambrožová, Láska 2016). Nicméně od roku 2009 teplota vzduchu postupně roste a nejteplejšími byly roky 2010/11 a 2016/17 (Obr. 2), kdy průměrná roční teplota dosahovala hodnot mezi –5,7 až –3,9 °C (Engel et al. 2024). Naopak nejchladnějšími byly roky 2009/10 a 2012/13 s ročními průměry –8,5 a –8,2 °C. Od roku 2015/16 opět průměrné teploty stoupají (Engel et al. 2024)



Obr. 2: Graf teplotních proměnných (AT=průměrná roční teplota, PDD=suma pozitivních denních stupňů, DJF=letní teploty vzduchu) na stanici Johana Gregora Mendela v období 2009/10–2020/21 (zdroj: Engel et al. 2024)

3 FYZICKOGEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉ OBLASTI

3.1 Ostrov Jamese Rosse

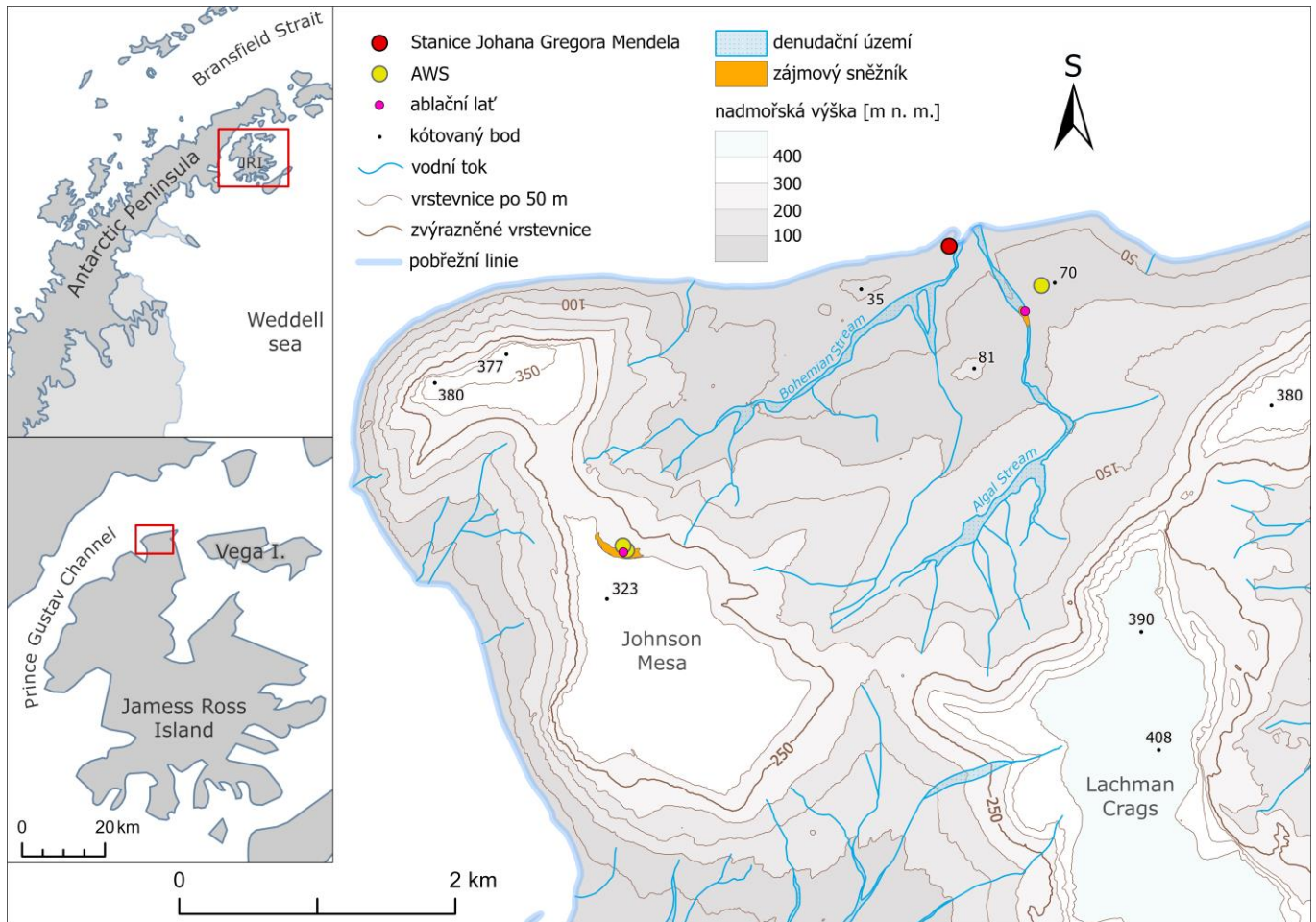
Ostrov Jamese Rosse leží v Jižním oceánu východně od poloostrova Trinity, jenž tvoří nejsevernější část Antarktického poloostrova. Od poloostrova je ostrov oddělen průlivem Prince Gustava a lze jej vymezit zeměpisnými souřadnicemi 63°47' j.š.–64°27' j.š. a 57°05' z.d.–58°24' z.d. (Láska et al. 2011a). V okolí ostrova Jamese Rosse se nachází řada menších ostrovů, z nichž k největším patří Vega, Seymour Island a Snow Hill Island. Rozloha ostrova Jamese Rosse činí 2378 km², přičemž 75 % z této plochy je pokryto ledovcem (Davies et al. 2012).



Obr. 3: Severní část poloostrova Ulu s viditelným nejsevernějším výběžkem ostrova a stanicí Johanna Gregora Mendela (foto: Engel)

Dvě zájmové lokality (Obr. 5) se nachází v severní části ostrova Jamese Rosse, na poloostrově Ulu (Obr. 4), kde se rovněž nachází Česká vědecká stanice Johanna Gregora Mendela (Obr. 3). Tato výzkumná stanice byla založena v roce 2006 na jedné z mořských teras (Láska et al. 2011b) a leží v nadmořské výšce 7 m n. m. (Láska et al. 2010). Nutno uvést, že lokalita erozní rýhy toku Algal se nachází

v nadmořské výšce cca 50 m n. m., což je níže než lokalita na úbočí Johnson Mesa, které dosahuje až 300 m n. m. Také nelze opomenout již zmíněnou sklonitost a orientaci svahů konkrétních lokalit, přičemž ablační tyč na úbočí plošiny Johnson Mesa náleží severovýchodnímu svahu se sklonem 9° a tyč na lokalitě erozního zářezu toku Algal leží na severozápadním svahu se sklonem do 5°.



Obr. 4: Severní část poloostrova Ulu se znázorněnými lokalitami studovaných sněžníků a automatických meteorologických stanic (z dat: ČGS, 2009)



Obr. 5: a) Lokalita v severním úbočí plošiny Johnson Mesa, b) Lokalita erozní rýhy toku Algal (foto: Engel)

3.2 Klimatická charakteristika

Oblast Antarktického poloostrova reprezentuje okrajovou část Antarktidy, charakteristickou nejvyššími teplotami, větším množstvím oblačnosti, vysokou variabilitou srážek a silnými větry, jejichž rychlost může dosahovat až 150 km/h (Láska, Prošek 2013).

Zatímco západní část Antarktického poloostrova se vyznačuje oceánským klimatem, ovlivněným relativně teplým Bellingshausenovým mořem, východní část Antarktického poloostrova a ostrov Jamese Rosse vykazují rysy polárního kontinentálního klimatu, které je ovlivněno Weddellovým mořem (Martin, Peel 1978). Charakter klimatu v západní části Weddellova moře je umocněn orografickou bariérou Antarktického poloostrova, která brání vpádu vlhčích západních větrů do této oblasti, především na jih ostrova Jamese Rosse (Láska et al. 2011a). V závětrí členitého reliéfu poloostrova vzniká tzv. fénový efekt, který se na závětrné straně projevuje sníženou vlhkostí vzduchu. Podle Cape et al. (2015) způsobují fény ve východní části poloostrova epizody výrazného oteplení, doprovázené ablací. Variabilita klimatu je kromě orografického efektu přisuzována Antarktické oscilaci, jenž představuje periodické zesilování a oslabování cirkumpolárního víru, pásma troposférických západních větrů obklopujících Antarktidu (van den Broeke et al. 2004). S tímto jevem je dle Clema et al. (2016) spojeno oteplování na severovýchodě Antarktického poloostrova během léta, kdy je oscilace v pozitivní fázi a dojde k zesílení západních větrů přinášejících oteplení na závětrnou stranu poloostrova. Dalším faktorem přispívající k variabilitě teplot je rozsah mořského zámrazu v okolních mořích (Clem et al. 2016).

Ambrožová a Láska (2016) uvádí, že v období 2005–2015 na stanici AWS-JGM byla naměřena průměrná roční teplota $-7,0$ °C. Nejchladnějšími měsíci jsou dle Lásky et al. (2011) červenec a srpen, kdy se může teplota vzduchu dostat až k -30 °C a naopak nejteplejší je leden, kdy nejvyšší průměrné denní teploty mohou přesáhnout $8-9$ °C. Charakteristické jsou zde teplotní inverze způsobené dobře odrážejícím se slunečním zářením a přítomností sněhové pokrývky, která izoluje zemský povrch od atmosféry (Láska, Prošek 2013).

Srážky se na ostrově vyskytují převážně ve formě sněhu a obecně v západní části Antarktického poloostrova klesají pod 500 mm/rok vodního ekvivalentu (Van

Wessem et al. 2016). Dle Kavana et al. (2020) se mocnost sněhové pokrývky na ledovcích ostrova Jamese Rosse pohybovala v rozsahu od 30 do 90 cm. Prostorová variabilita mocnosti sněhu je dána zejména nadmořskou výškou, expozicí a topografickými podmínkami (Kavan et al. 2020). Vlivem větru a místních vichřic mohou být ale sněhové srážky snadno odvívány a redistribuovány (Ondrácková et al. 2020) do zcela jiných míst.

3.3 Geologická charakteristika

Horninové podloží severní části AP je převážně tvořeno metamorfovanými křídovými sedimenty s jurskými kyselými vulkanity (Bastias et al. 2020). Kromě zpevněných vulkanických tufů se zde nacházejí také mocné žíly ryolitu (Gloser, Prošek 2013).

Kromě značného množství křídových ledovcových a mořských sedimentů, které jsou dle Mlčocha (2013) bohaté na zkameněliny, je podloží ostrova Jamese Rosse také tvořeno neogenními bazalty a hyaloklastickými brekciemi. Tato oblast bazaltických hornin pocházejících z kenozoika patří do vulkanické skupiny ostrova Jamese Rosse, na kterém jsou i nejvíce rozšířeny a vyvinuty (Mlčoch, Nývlt 2013). Mlčoch a Nývlt (2013) také uvádějí, že na odledněném severu ostrova, konkrétně na poloostrově Ulu, je možné studovat právě vztah zalednění a místního vulkanismu, který sahá až do dob před 7 mil. lety.

Plošina Johnson Mesa, na jejímž úbočí se nachází první studovaná lokalita, je tvořeno hyaloklastickou brekcií s částmi bazaltických láv z mladšího miocénu (ČGS, 2020). Lokalita v erozní sníženině toku Algal je zahloubena do glaciogenetických, glaciomarinních a marinních sedimentů. Podle Stringera et al. (2024) je povodí toku Algal a toku Bohemian tvořeno převážně konglomeráty, pískovci a jílovcí. Sedimenty v rámci povodí toku Algal se skládají z jemnozrnných pískovců a jílovců. Obě povodí jsou také protkány neogenními vyvěřelými horninami a to převážně brekciemi, tufy a bazalty (ČGS, 2009).

3.4 Geomorfologická charakteristika

Největší odledněná oblast o rozloze 312 km² se nachází v severní část ostrova (Kavan et al. 2017), kde podle Nývlt et al. (2014) začalo odledňování z dat nasbíraných Schmidtovým kladivem před 12,9 ± 1,2 tisíci lety. Naopak jižní část je

pokryta ledovou čapkou (Jennings et al. 2021), která leží na vyhaslém vulkánu Mount Haddington (Smellie 1999) dosahující výšky 1620 m n. m. Souvislý permafrost zasahuje až do hloubky 67 m (Borzotta, Trombotto 2004), přičemž aktivní vrstva dosahuje hloubky cca od 0,5 do 1,2 m (Jennings et al. 2021).

Reliéf severní části poloostrova Ulu tvoří především stolové hory, známé jako mesy nebo-li mesety (Obr. 6), které jsou tvořeny výlevy lávových proudů bazaltového složení (Mlčoch, Nývlt 2013). Příkladem takové stolové hory může být již zmíněná plošina Johnson Mesa s nejvyšším bodem 323 m n. m. nebo mesa Lachman Crags dosahující výšky 408 m n. m. (Stringer et al. 2024). Svahy těchto stolových hor jsou díky málo odolným sedimentům v podloží bazaltů vystavěny mrazovému zvětrávání, což má za následek vznik osypů (Jagoš 2011).



Obr. 6: Charakteristická krajina ostrova Jamese Rosse, lze zde vidět typické stolové hory nebo ledovcové kary (foto: doc. RNDr. Zbyněk Engel, Ph.D.)

3.5 Hydrologická charakteristika

Říční toky na ostrově Jamese Rosse bývají napájeny z ledovců, sněžníků i činné vrstvy (Kavan et al. 2017) a na dolním toku mají charakter divočících toků s řadou koryt oddělených malými ostrůvky (Jennings et al. 2021). Tento typ koryt je ve vyšších zeměpisných šířkách běžný, neboť jsou charakteristické pro oblasti s rozkolísaným odtokem, hrubými klasty a rychlými přívaly sedimentů v záplavové

oblasti (Goudie 2004). Značná rozkolísanost odtoku je nejčastěji výsledkem intenzivního tání ledovců, které má výrazný vliv také na fluviální transport (Kavan et al. 2017).

Ze zájmové lokality na úbočí plošiny Johnson Mesa vytéká jeden z pramenů toku Bohemian, jenž ústí nedaleko toku Algal, jehož zdrojem je jeden ze sněžníků v severovýchodním svahu zmiňované plošiny. Povodí obou toků je odděleno plochým hřbetem, který vymezuje povodí toku Dirty, jenž je nejvýznamnějším přítokem toku Bohemian (Kavan et al. 2017).

4 METODIKA

4.1 Použitá data

4.1.1 Ablace

K vyhodnocení denních změn výšky povrchu sněžníků byla použita data sezóny 2020/21 ze dvou fotopastí, značky Bunaty Wide Full HD s maximálním rozlišením 24 MP. Fotopast zaměřuje ablační tyče ve studovaných lokalitách svahové deprese v severním úbočí plošiny Johnson Mesa a erozní rýhy na dolním toku Algal (Obr. 8). Jedná se o soubor snímků s ablační tyčí, na které jsou umístěny modré a červené pásky pro určení vzdáleností mezi jednotlivými segmenty v rámci tyče. Určité segmenty označené páskami byly rozděleny pomocí vytvořené stupnice na stejně velké dílky. Pro zpracování snímků byla využita stupnice dělená na jednotky centimetrů, přičemž vzdálenosti mezi segmenty ablačních tyčí byly různé v oblasti Johnson Mesa a toku Algal. Proto bylo nutné upravit měřítko stupnice podle potřeby a vytvořit tak stupnici pro každý sněžník zvlášť. U lokality úbočí Johnson Mesa byly segmenty označené páskami od sebe daleko 20 cm a na lokalitě u toku Algal byly tyto segmenty od sebe vzdáleny 25 cm. Vytvořené stupnice byly děleny na centimetry, což byly nejmenší možné jednotky odečtu.

Snímky ablačních tyčí byly k dispozici u sněžníku úbočí plošiny Johnson Mesa od 31. 1. 2021 do 21. 4. 2021 a pro sněžník u toku Algal od 20. 1. 2021 do 30. 4. 2021.

4.1.2 Teplota vzduchu

Data byla měřena pomocí teplotních čidel umístěných na automatických meteorologických stanicích (AMS), které se nacházejí v blízkosti zkoumaných lokalit (Obr. 4) na souřadnicích uvedených v tabulce (Tab. 1). AMS v blízkosti toku Algal nese označení Formica a leží v nadmořské výšce 194 m n. m. Stanice Lagos je umístěna u jezírek v severním úbočí plošiny Johnson Mesa v nadmořské výšce 253 m n. m., což odpovídá přímo nadmořské výšce sněžníku.

Tyto automatické stanice zaznamenávají teplotu vzduchu ve výšce 2 m nad zemí a obě teplotní čidla AMS měří s přesností $\pm 0,15$ °C. Teplotní data byla poskytnuta ve formě hodinových záznamů pro sezónu 2020/21. Data pro potřeby

bakalářské práce poskytl pan doc. Mgr. Kamil Láska, Ph.D z Geografického ústavu Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity.

Záznamy teplot obsahovaly hodnoty v období od 1. 10. 2020 do 30. 4. 2021, nicméně pro určité části práce byla využita část řady teplot odpovídající datům ablace od 31. 1. 2021 do 21. 4. 2021 u sněžníku Johnson Mesa a pro sněžník u toku Algal od 20. 1. 2021 do 30. 4. 2021. Tato konkrétní rozmezí byla stanovena v souladu s obdobím, pro které byly k dispozici snímky z fotopasti.

Tab. 1: Souřadnice automatických meteorologických stanic (stanice Lagos byla před zimou přesunuta mimo dosah lavin, cca o 30 m k SV)

Název AMS	Zeměpisná délka [°]	Zeměpisná šířka [°]
Lagos (JM) –léto	-57.93066697	-63.81980974
Lagos (JM) –zima	-57.93121087	-63.81951596
Formica (Algal)	-57.86909443	-63.80297218

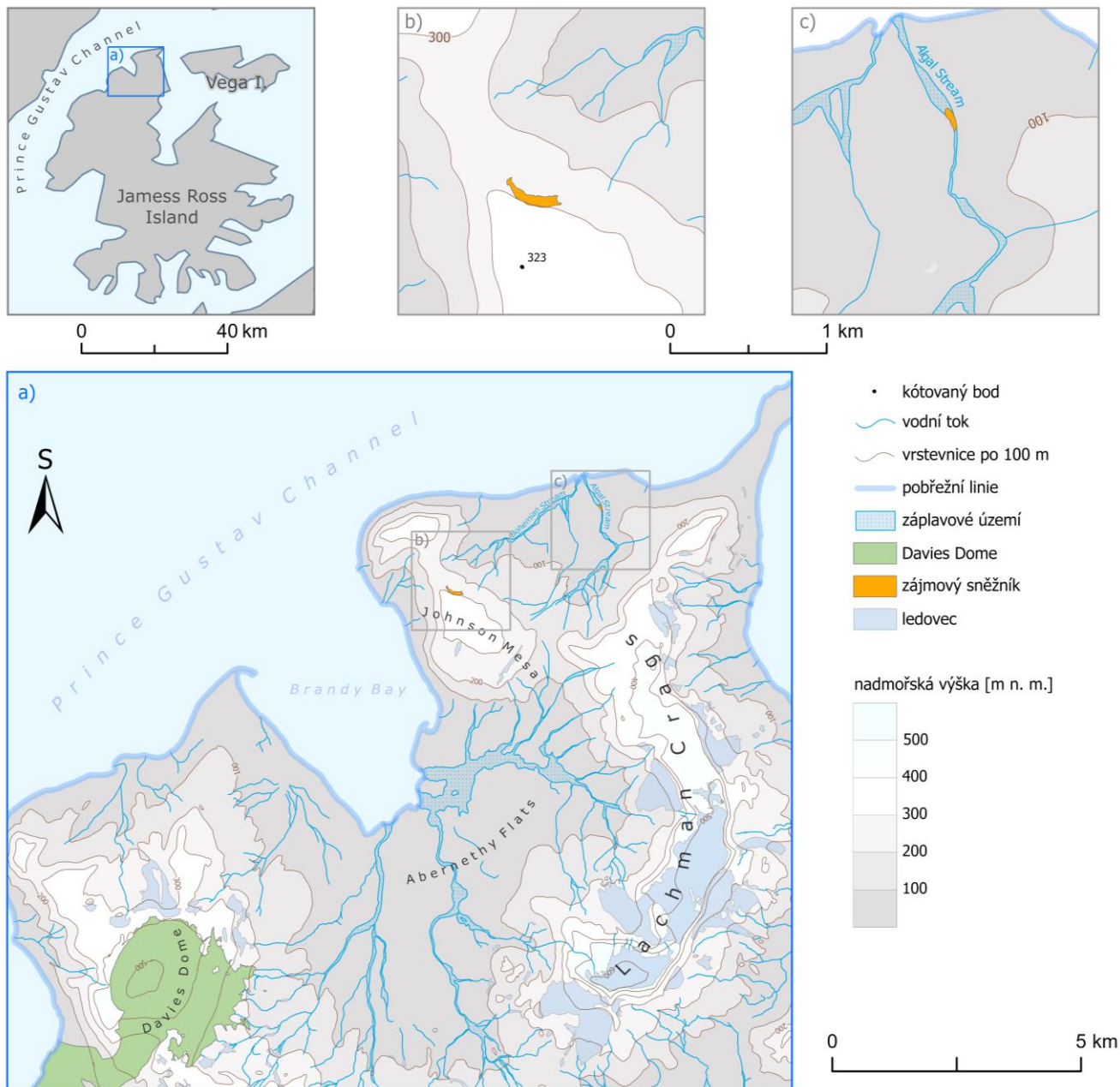
4.1.3 Výška sněhu na lokalitě Davies Dome

K této práci byla také poskytnuta referenční data ledovce Davies Dome. Tento ledovec představuje ledovcovou čapkou s radiálním pohybem z vrcholu stolové hory (Davies et al. 2013). Davies Dome se nachází jihozápadně od zájmových sněžníků (Obr. 7) v nadmořské výšce mezi 400 a 450 m n. m. a vytéká směrem na jih do zálivu Whisky Bay (Engel et al. 2024). Místo měření se nachází na temeni ledovce přibližně v nadmořské výšce 510 m n. m.

Záznamy výšky povrchu ledovce byly měřeny automatickým sonickým čidlem JUDD, který zaznamenává změnu výšky nad povrchem ledovce prostřednictvím pulsů ultrazvuku. Na základě délky času přenosu signálu je odvozena výška, neboli vzdálenost nad povrchem sněžníku a to s přesností ± 1 cm. Nutno podotknout, že 22. 2. 2021 došlo k výměně čidla, což mohlo přispět k nehomogenitě datové řady.

Data z této lokality byla pro potřeby bakalářské práce poskytnuta ve formě záznamu hodnoty výšky čidla nad povrchem od 1. 10. 2020 do 30. 4. 2021. Zaznamenané hodnoty nebyly stanoveny ke každému dni tohoto období a mezi

některými záznamy se vyskytovaly mezery v řádech několika dnů. Poskytovatelem těchto dat je pan doc. Mgr. Kamil Láška, Ph.D.

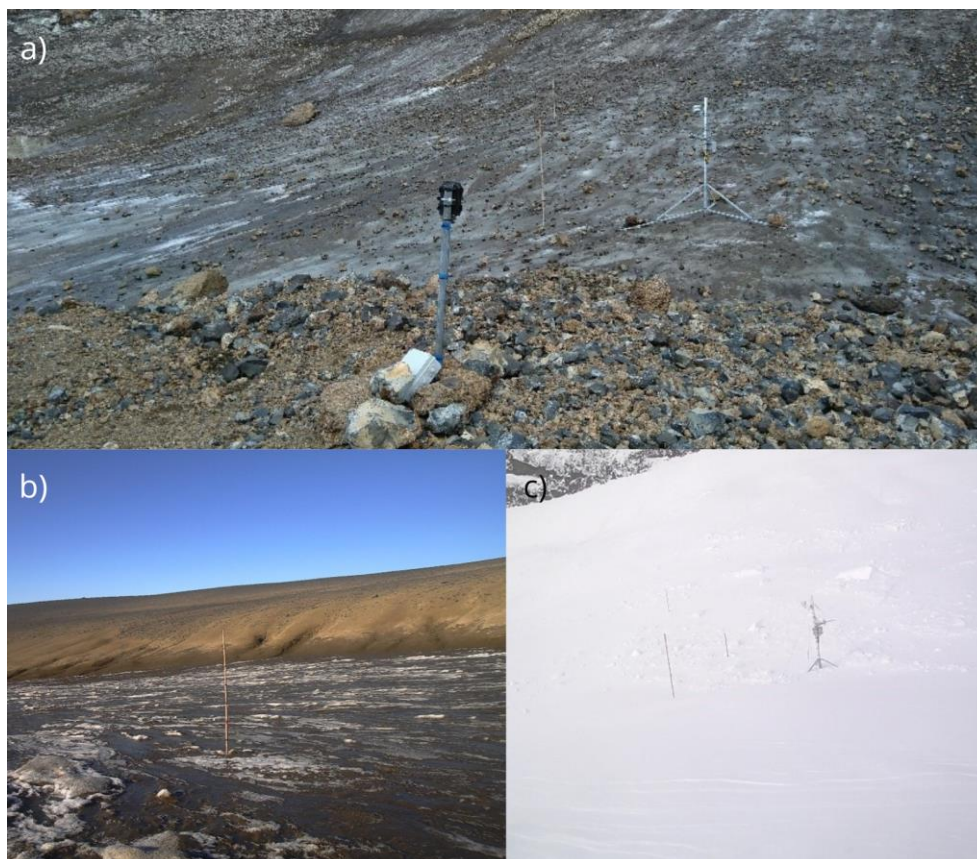


Obr. 7: Mapa znázorňující polohu Davies Dome vůči zájmovým lokalitám (JM a Algal), (z dat ČGS, 2009)

4.1.4 Data pro tvorbu map

Pro tvorbu map v prostředí ArcGIS Pro sloužících k fyzickogeografické charakteristice daného území, lokalizaci automatických meteorologických stanic, studovaných sněžníků i pro charakteristiku sklonu či orientaci svahů sněžníků, byla využita data České Geologické služby (2009).

Sněžníky byly vymezeny na základě snímků z dronu, poskytnutých Mgr. Filipem Hrbáčkem, Ph.D. z Geografického ústavu Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity.



Obr. 8: a) Lokalita v severním úbočí plošiny Johnson Mesa s fotopastí, ablační tyčí a meteostanicí, b) Lokalita erozní rýhy toku Algal s ablační tyčí, c) lokalita na úbočí Johnson Mesa s ablační tyčí 12. 3. 2021

4.2 Zpracování dat

Fotografování ablačních tyčí probíhalo denně ve dvouhodinových intervalech. Pro sledování změn výšky povrchu sněžníků byl každý den vybrán jeden snímek a to vždy s cílem hodnotit změnu výšky sněhové pokrývky ve stejnou denní dobu. Pro odečet délky tyčí byl ze snímků zvolen 24hodinový interval, a to k 8 hodině ranní, kdy byly po většinu letního období nejvhodnější observační podmínky. Ačkoliv se ve většině případů podařilo tento čas dodržet, vlivem nepříznivého počasí došlo občas k zamlžení či namrznutí čočky fotopasti. Nelze také opomenout, že od druhé poloviny dubna už byla v 8 hodin tma. V takových situacích bylo nutné vždy vybrat jiný viditelný snímek pořízený v odlišnou denní dobu, a to opět v co nejmenším časovém

rozmezí od zvolené 8.hodiny. Vlivem nepříznivých podmínek nebylo možné hodnotu odečíst ze žádného z dostupných snímků v termínech uvedených v tabulce 2.

Tab. 2: Dny, pro které chybí záznam změny povrchu sněžníku

Lokalita	Chybějící odečty změny povrchu sněžníku v datové řadě
Johnson Mesa	15. 4., 16. 4. 2021
Algal	24. 2., 6. 3., 25. 3., 26. 3., 9. 4., 12. 4., 15. 4., 16. 4., 21. 4., 28. 4. 2021

Teplotní data byla zpracovávána v programu Microsoft Excel. Pro hodnocení vztahu teploty s ablací byly z hodinových záznamů vypočítány průměrné denní teploty a sumy pozitivních denních teplot (positive degree days, PDD).

Sumy pozitivních denních teplot se počítají jako součet všech kladných teplot v jednom dni, překračujících hodnotu 0 °C, vydělený počtem měření za den, zde tedy 24mi měřeními. Tato proměnná je definována jako:

$$PDD = \sum_{i=1}^{24} \left(\frac{T_i}{24} \right) \text{ pro } T_i > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pro znázornění vztahu teploty a změny výšky sněhové pokrývky byla využita regresní analýza, která umožňuje vyjádřit vztah mezi dvěma proměnnými – mezi závislou a nezávislou proměnnou. Regresní model byl sestaven pro tři nezávislé proměnné: průměrná denní teplota, sumy pozitivních denních teplot a maximální denní teplota. Závislou proměnnou představovala změna výšky povrchu sněhové pokrývky. Pro vyjádření sum pozitivních denní teplot byla data poté vyfiltrována bez nulových hodnot, které by na proces ablace jako takový neměly mít vliv.

V rámci analýzy bylo také ověřováno, zda jsou data proměnných normálně rozložena. Rozložení dat změny výšky povrchu a teplotních proměnných bylo stanoveno na základě histogramů a Shapiro-Wilkova testu normality provedeného v prostředí R-studio. Žádná data před filtrací nevykazovala normální rozložení. Pouze proměnná průměrné denní teploty a maximální denní teploty na lokalitě JM jsou po filtraci dat normálně rozloženy. Na základě nenormálního rozdělení všech

ostatních datových řad byl využit výpočet Spearmanova korelačního koeficientu, který není na normálním rozložení závislý.

Během testování byla stanovena nulová hypotéza, která říká, že proměnné jsou na sobě nezávislé. Tato hypotéza byla na základě výpočtů korelačních koeficientů zamítnuta.

Tvorba grafů regresní analýzy, výpočty koeficientů i testy normálního rozložení dat byly prováděny v prostředí R-studio.

Pomocí teplotních záznamů z obou lokalit bylo možné vyhodnotit začátek a konec ablační sezóny 2020/21 a charakterizovat její průběh z hlediska teploty. Pro vymezení začátku sezóny bylo potřeba vyhodnotit v jakém období se již začaly objevovat vícedenní shluky kladných průměrných denních teplot a konec byl naopak stanoven v období, kdy byly naposledy tyto vícedenní shluky kladných průměrných denních teplot zaznamenány. Shluky teplot, které byly využity k vymezení ablační sezóny představovaly průměrné denní teploty, vypočítané z hodinových záznamů, které překračovaly hranici 0,15 °C. Tato hodnota 0,15 °C byla stanovena na základě přesnosti měření AMS stanic.

K přehledu o chodu teplot během celé sezóny 2020/21 byly z této sady dat vypočítány také měsíční průměrné teploty vzduchu. Dále byl vypočten celkový průměr teplotních záznamů a to vše pro každou zájmovou lokalitu zvlášť.

Při zpracování dat z ledovce Davies Dome byla z důvodu omezeného množství denních záznamů a pro lepší interpretaci dat využita metoda klouzavého průměru (Obr. 12). Tato metoda umožnila propojení chybějících intervalů mezi měřeními a zároveň zhladila průběh křivky, čímž eliminovala vliv odlehlých hodnot. Použití tohoto typu průměru tak přispělo ke snadnějšímu vyhodnocení změn výšky povrchu a k následnému porovnání se zájmovými lokalitami.

5 VÝSLEDKY

5.1 Ablace na zájmových lokalitách

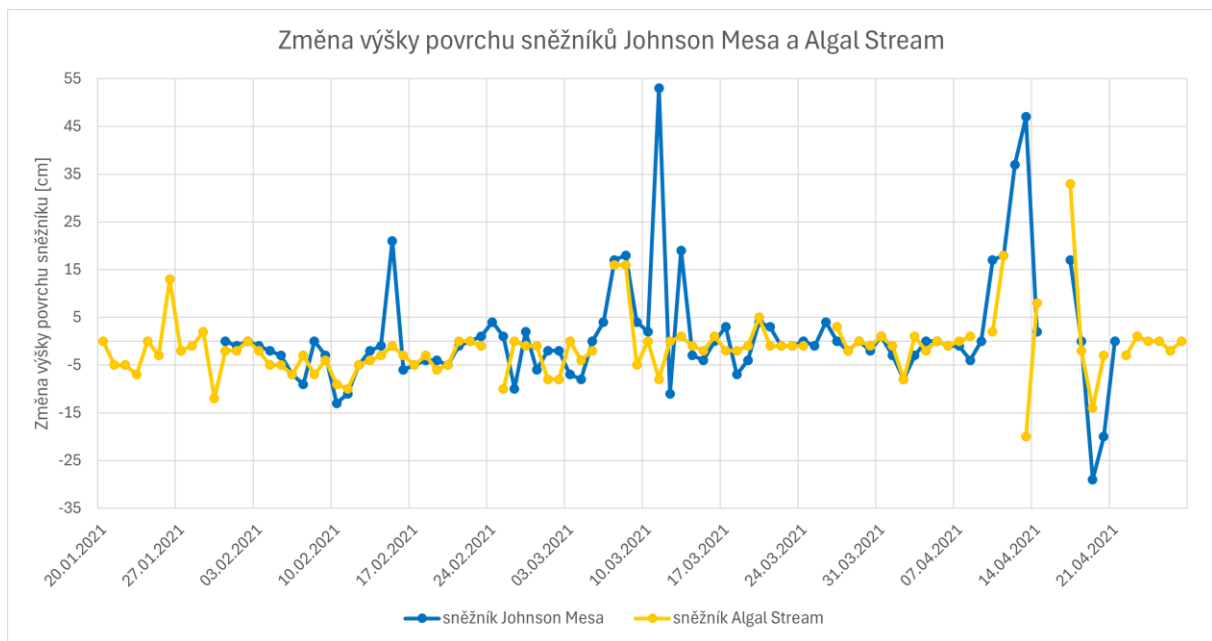
Datová řada ablace sněžníku na úbočí Johnson Mesa začíná 31. 1. 2021 a končí 21. 4. 2021, přičemž obsahuje několik odlehlých hodnot, které naznačují výraznější změny výšky povrchu sněžníku. Při spočítání průměrné hodnoty ze všech odečtených hodnot z ablačních tyčí v období od ledna do dubna 2021, vyšlo, že na lokalitě severního úbočí plošiny Johnson Mesa došlo průměrně ke změně výšky povrchu o 1 cm/den. Celková změna výšky povrchu sněžníku tak činila 76 cm. Nejvyšší zaznamenaná hodnota ablace dosáhla -29 cm (19. 4. 2021). Obecně největší hodnoty ablace na této lokalitě byly zaznamenány ve dnech 10. 2., 11. 2., 26. 2., 4. 3., 12. 3., 2. 4. a 19. 4. 2021. Naopak nejvyšší hodnota akumulace činila na tomto sněžníku 53 cm (11. 3. 2021), přičemž výrazný nárůst výšky sněhové pokrývky připadal na dny 15. 2., 7. 3., 8. 3., 11. 3., 13. 3., 11. 4., 12. 4., 13. 4. a 17. 4. 2021, což může být následkem vydatných epizod sněžení nebo jiných meteorologických faktorů ovlivňující ukládání sněhu. Ze sledovaného období lze také označit 42 dní náležící ablací a 23 dní, kdy probíhala akumulace.

U sněžníku toku Algal bylo monitorováno delší období začínající již 20. 1. 2021 s koncem datové řady 30. 4. 2021. Průměrná změna výšky povrchu zde vyšla záporná (-1,4 cm/den) a celkově změna výšky povrchu sněžníku činila -123 cm. Nejvyšší hodnota ablace dosáhla -14 cm a to 19. 4. 2021. Nejvýraznějšími dny, kdy ablace proběhla, byly 30. 1., 11. 2., 25. 2., 11. 3., 2. 4., 13. 4. a 19. 4. 2021. Nejvýraznější akumulace činila 17. 4. 2021 33 cm. K akumulaci docházelo nejvíce ve dnech 26. 1., 7. 3., 8. 3., 11. 4. a 17. 4. 2021. Z hlediska počtu dní připadalo na ablací 57 dní a 15 dní na proces akumulace.

Obecně se hodnoty změny výšky povrchu sněhu po většinu času pohybovaly v řádech jednotek centimetrů. Vyšších hodnot dosahovaly záznamy ve dnech, kdy byla hodnota změny výšky sněhu kladná a probíhal proces akumulace.

Nutno zmínit, že ačkoliv se na první pohled od sebe křivky průměrných hodnot obou lokalit liší, existují dny, kdy došlo k podobným reakcím sněhové pokrývky ve formě ablace či akumulace na obou místech zároveň (Obr. 9). Právě u lokality erozní rýhy toku Algal se objevilo vícero chybějících dní, kdy změna výšky nebyla možná zaznamenat z hlediska nepříznivých podmínek ovlivňující snímky. Z tohoto důvodu je

obtížnější v těchto místech určit chování sněhové pokrývky a tudíž i vztah vzhledem k teplotním podmínkám, nicméně data naznačují, že by zde mohly být obdobné tendence jako u lokality na úbočí Johnson Mesa.



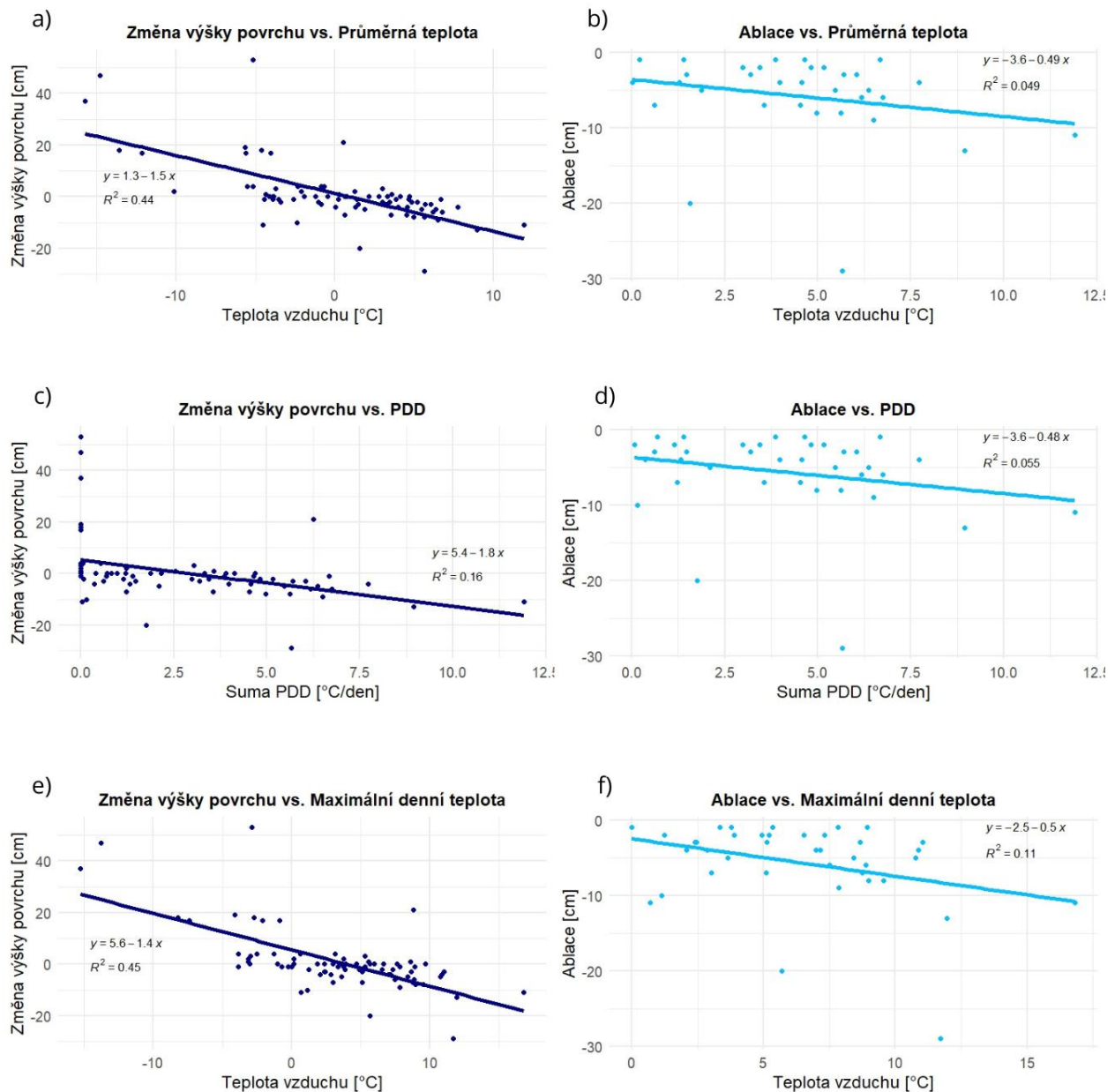
Obr. 9: Změna výšky povrchu studovaných sněžníků

5.2 Vztah ablace a teploty vzduchu

Výsledky provedené analýzy ukazují vztah mezi změnou povrchu sněžníků v rámci obou studovaných lokalit a měnící se teplotou. Tento vztah dvou proměnných je negativní. Je tedy patrné, že s narůstající teplotou klesá povrch sněžníku, což je projev procesu ablace.

Při vykreslení regresní analýzy hodnota koeficientu determinace vyšla u vztahu maximální denní teploty a změny výšky povrchu sněžníku na úbočí JM 0,45, (Obr. 10e), což vede k závěru, že maximální denní teploty dobře vysvětlují variabilitu procesu změn výšky povrchu. Dále u tohoto sněžníku vyšel koeficient 0,44 u vztahu průměrné denní teploty se změnou výšky povrchu (Obr. 10a) a 0,16 u vztahu výšky povrchu s pozitivními denními teplotami (Obr. 10c). Na lokalitě toku Algal dosáhl koeficient determinace nejvyšší hodnoty 0,3 opět ve vztahu změny výšky povrchu s maximální denní teplotou (Obr 11e). U sum pozitivních denních teplot a změny výšky povrchu 0,13 (Obr. 11c) a u vztahu průměrné denní teploty se změnou výšky sněžníku 0,29 (Obr. 11a). U výsledků lze vidět, že velkou roli v korelaci i hodnotě koeficientu determinace (R^2) hrají odlehlé hodnoty datových řad, které korelaci

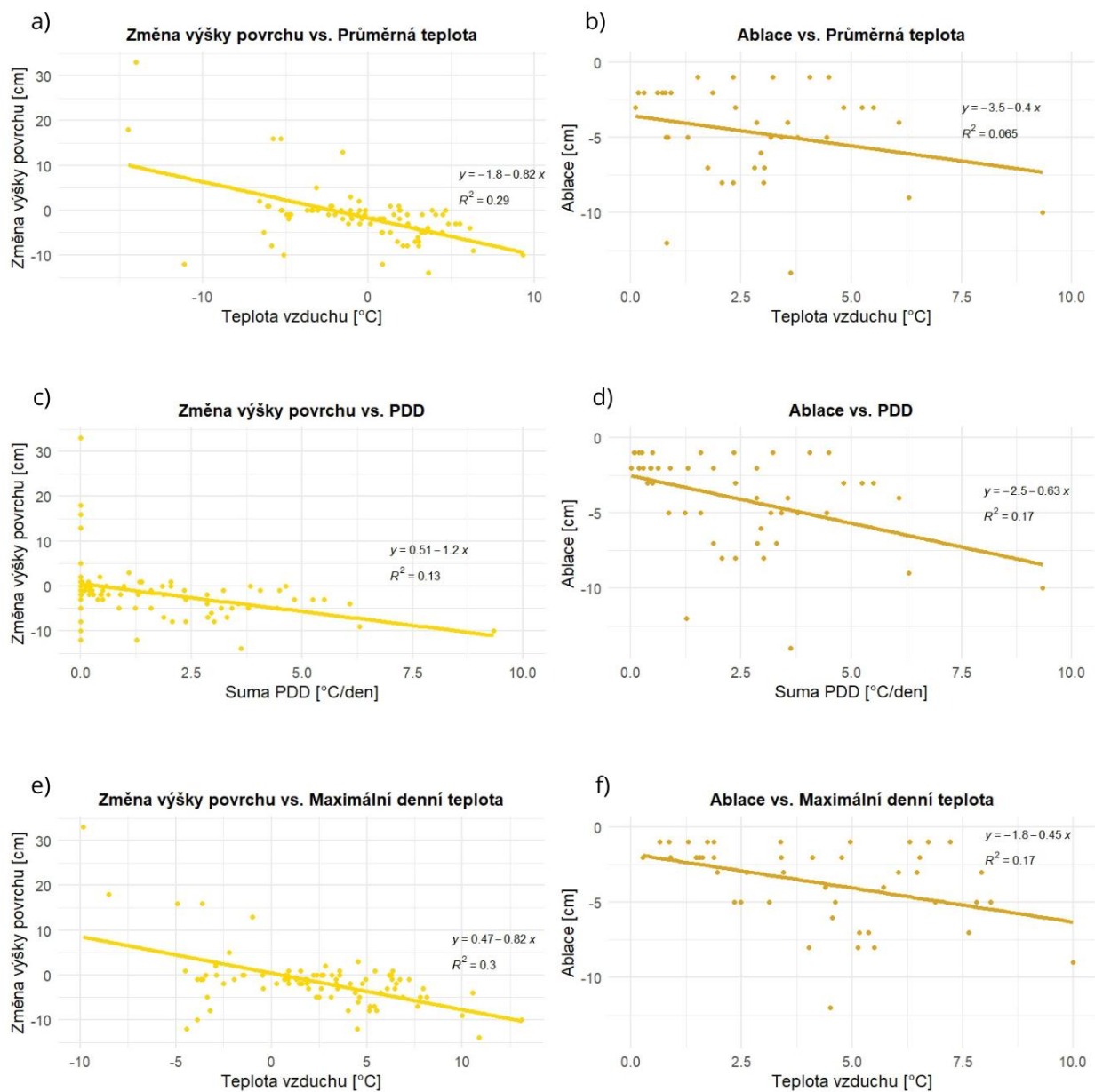
snížují. Koeficient determinace se pohybuje mezi 0 až 1 a ukazuje, jak dobře vyhotovený model vysvětluje variabilitu datových řad.



Obr. 10: Regresní analýzy pro vztah teplotních proměnných lokalit úbočí Johnson Mesa

Pro naplnění cílů této práce se jeví jako stěžejní část hodnoty v analýze náležící ablačním procesům. Tyto procesy jsou podmíněné kladnými teplotami a proto byl soubor dat omezen hodnotou teploty vzduchu > 0 °C. Ze souboru byly rovněž odstraněny kladné změny výšky povrchu, které reprezentují proces akumulace.

Po filtraci dat a osekání řady o kladné hodnoty změn výšky povrchu sněžníků, tedy akumulaci, a záporné teplotní hodnoty, lze vidět, že koeficienty determinace se snížily. Přesto však výsledky ukazují alespoň slabý vztah zkoumaných proměnných a lze proměnné mezi sebou porovnat. V rámci lokality u JM z vyfiltrovaných dat vykazuje největší hodnotu koeficient determinace u vztahu maximální denní teploty a ablace s hodnotou 0,11 (Obr. 10f), přičemž tento vztah byl nejsilnější i před filtrací dat. Pro vztah průměrné denní teploty s ablací a PDD s ablací vyšly koeficienty $< 0,1$ (Obr. 10b, 10d).



Obr. 11: Regresní analýzy pro vztah teplotních proměnných v rámci lokality erozní rýhy Algal Stream

U toku Algal po vyřídění dat vychází nejvyšší hodnota koeficientu determinace 0,17 u vyjádření vztahu maximální denní teploty s ablací (Obr. 11f) a u vztahu PDD s ablací (Obr. 11d). Při filtrování dat došlo k navýšení koeficientu vztahu PDD s ablací z 0,13 na 0,17. U vztahu ablace a průměrné denní teplotě vyšel koeficient determinace $< 0,1$ (Obr. 11b), což značí velmi slabý vztah.

Výpočet Spearmanova korelačního koeficientu potvrdil negativní vztah mezi proměnnými. Největší hodnota korelačního koeficientu dosáhla na sněžníku úbočí JM

-0,67 ve vztahu průměrné denní teploty a změny výšky povrchu (Tab. 3), nicméně PDD i maximální denní teploty ukazují silný vztah se změnou výšky povrchu sněžníků. Po očištění dat všech proměnných došlo v rámci lokality JM ke snížení hodnoty korelačních koeficientů přibližně o polovinu (Tab. 4), nicméně negativní vztah zde stále existuje. U lokality toku Algal vyšla nejvyšší hodnota korelačního koeficientu -0,49 ve vztahu průměrné teploty spolu se změnou výšky povrchu (Tab. 3) a také ve vztahu maximální denní teploty a ablace (Tab. 4).

Tab. 3: Hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu vztahu změny výšky povrchu s teplotními charakteristikami

Teplotní charakteristika	Korelační koeficient (lokality na úbočí JM)	Korelační koeficient (lokality erozní rýhy toku Algal)
Průměrná teplota	-0,67	-0,49
Sumy pozitivních denních teplot	-0,63	-0,46
Maximální denní teplota	-0,61	-0,42

Tab. 4: Hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu vztahu ablace s teplotními charakteristikami (bez nulových a záporných hodnot)

Teplotní charakteristika	Korelační koeficient (lokality na úbočí JM)	Korelační koeficient (lokality erozní rýhy toku Algal)
Průměrná denní teplota	-0,31	-0,22
Sumy pozitivních denních teplot	-0,3	-0,46
Maximální denní teplota	-0,32	-0,49

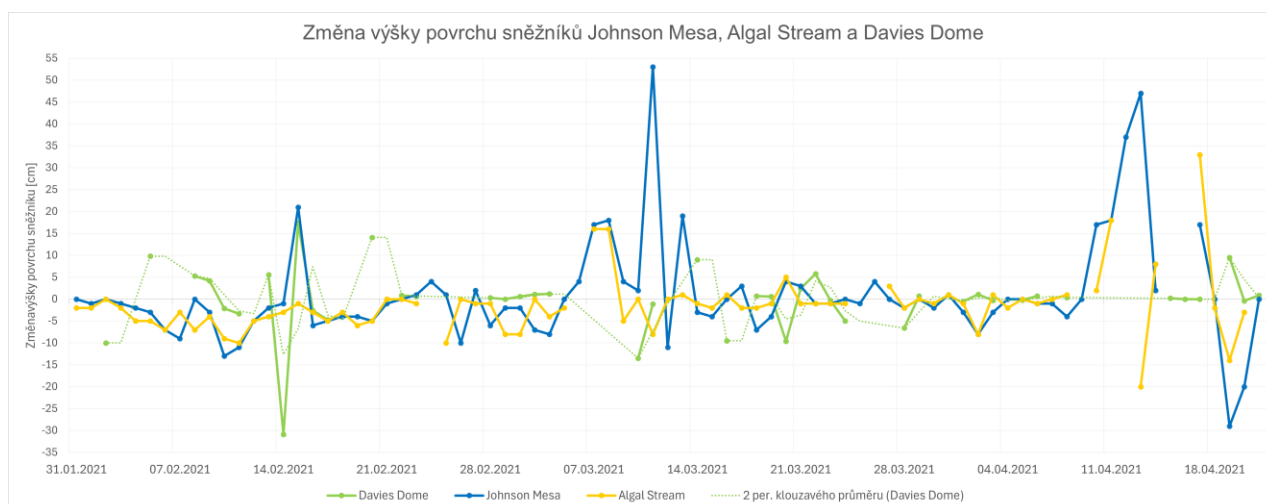
Obecně variabilitu změny výšky povrchu nejlépe vysvětluje proměnná maximální denní teploty, ale nejsilnější vztah existuje mezi průměrnou denní teplotou a změnou výšky povrchu. Z hlediska korelačních koeficientů se ale i sumy pozitivních denních teplot jeví jako spolehlivý prediktor změny výšky povrchu i ablace. Obě lokality z hlediska topografických podmínek reagují na teplotní podmínky zcela odlišně a to může být způsobeno mnoha faktory, jako jsou odlišné povětrnostní

podmínky, rozdíly v množství sněhu či jeho charakteru a především sklon a orientace daných lokalit. Lokalita ablační tyče na sněžníku severního úbočí plošiny JM náleží severovýchodní orientaci se sklonem 9° a lokalita tyče na sněžníku toku Algal má orientaci na severozápad se sklonem do 5°.

5.3 Ablace na lokalitě Davies Dome

Davies Dome, ledovcová čapka, nacházející se jihozápadně od dvou studovaných lokalit, se v období od 1. 1. 2021 do 25. 4. 2021 lišila od studovaných sněžníků ve změnách výšky povrchu sněhu. Tyto rozdíly lze přičíst odlišným klimatickým podmínkám dané lokality, která se nachází ve vyšší nadmořské výšce a to o přibližně 300 m výše než sněžník u Johnson Mesa a o 500 výše než lokalita u toku Algal. Vyšší nadmořská výška ledovce se projevuje nižšími teplotami, ale také odlišnými podmínkami pro ukládání sněhu v porovnání s lokalitami v nižších nadmořských výškách.

Největší výkyvy na ledovci Davies Dome jsou zaznamenány v období od konce listopadu 2020 do konce února 2021. Významná epizoda tání dle dat připadá na druhou polovinu února počínaje 14. únorem, kdy došlo dle výsledků ke snížení povrchu sněžníku, tudíž k výrazné ablaci. S březnem a dubnem 2021 se výkyvy postupně snižují a dochází ke stabilizaci procesů, omezenými pravděpodobným poklesem teplot a nárůstem sněhové pokrývky na konci hlavní ablační sezóny (Obr. 12). Nicméně nutno brát v potaz údajnou výměnu čidla měřícího automaticky změnu výšky sněhové pokrývky, ke které došlo 22. 2. 2021 a mohla by tak výsledky zkreslit.



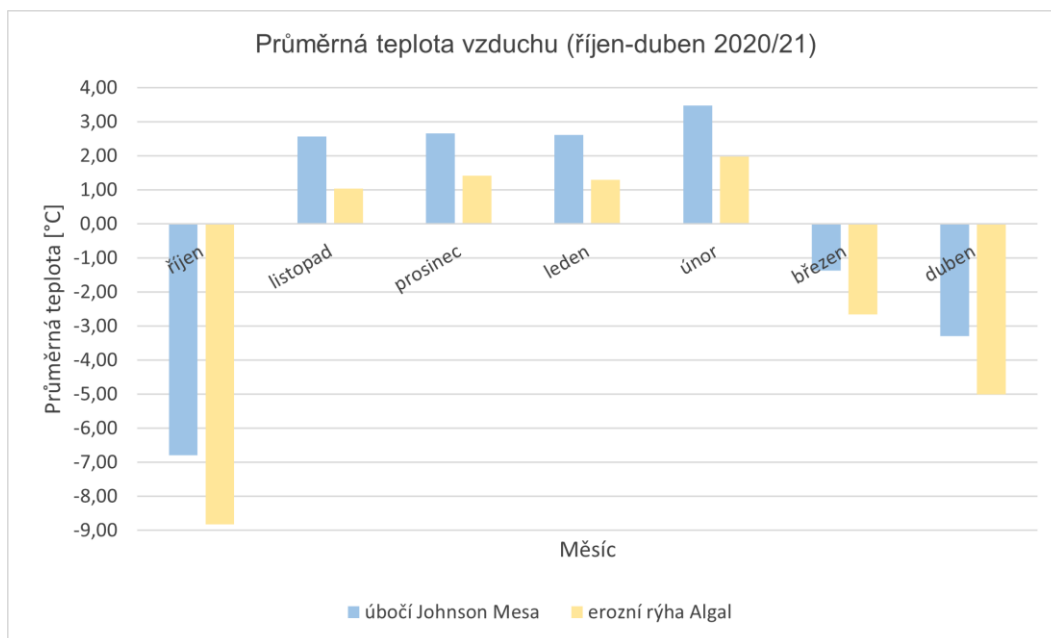
Obr. 12: Porovnání změn výšky povrchu sněžníků studovaných lokalit a referenčního ledovce Davies Dome

Lze vypožorovat, že trend změny výšky povrchu se mezi lokalitami značně liší. Křivky reprezentující zájmové lokality této práce vykazují několik náhlých nárůstů i poklesů výšky povrchu. Naproti tomu Davies Dome, jehož průběh je dokreslen formou klouzavého průměru, vykazuje stabilnější chování (Obr.12), což lze přisuzovat odlišné dynamice změn výšky povrchu sněhu ve vyšších nadmořských výškách. Dalším důvodem stabilnějších podmínek na lokalitě Davies Dome může být rozloha ledovce, která je větší než zájmové sněžníky, které mají menší rozlohu a mohou tak být na tání citlivější.

5.4 Abláční sezóna 2020/21

Data z automatických meteorologických stanic ukazují, že v období od 1. 10. 2020 do 30. 4. 2021 činila průměrná teplota na lokalitě úbočí Johnson Mesa 0 °C a v rámci erozní rýhy Algalu -1,5 °C.

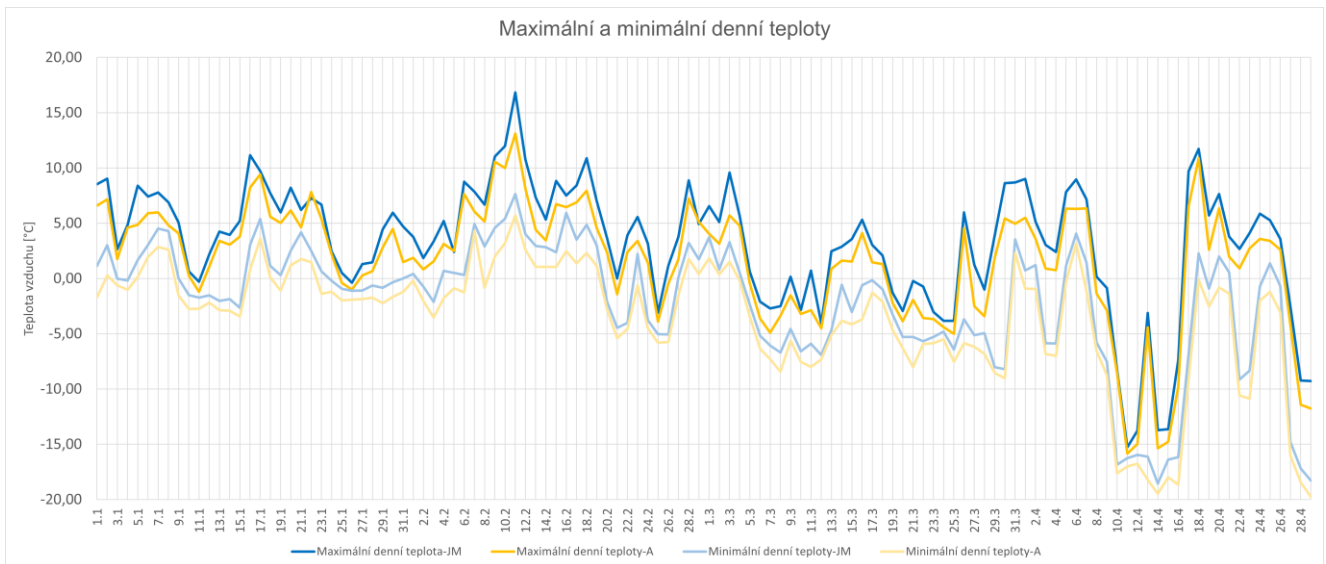
Nechladnějším měsícem byl na obou lokalitách říjen (Obr. 13), kdy průměrná měsíční teplota na lokalitě úbočí plošiny JM činila -6,8 °C a na lokalitě u toku Algal klesla až k -8,8 °C. Říjen je na jižní polokouli jarním měsícem, tudíž se v následujícím období začínají pozvolna zvyšovat teploty v rámci zesílení západních větrů vlivem pozitivního jižní oscilace. S příchodem léta na jižní polokouli je slunce výše nad obzorem a na povrch tak přichází nejvíce slunečního záření. Od listopadu do února se průměrné měsíční teploty již pohybovaly v kladných hodnotách, přičemž nejvýše se dostala průměrná teplota v únoru. Koncem antarktického léta se již průměrná měsíční teplota dostávala pod 0 °C.



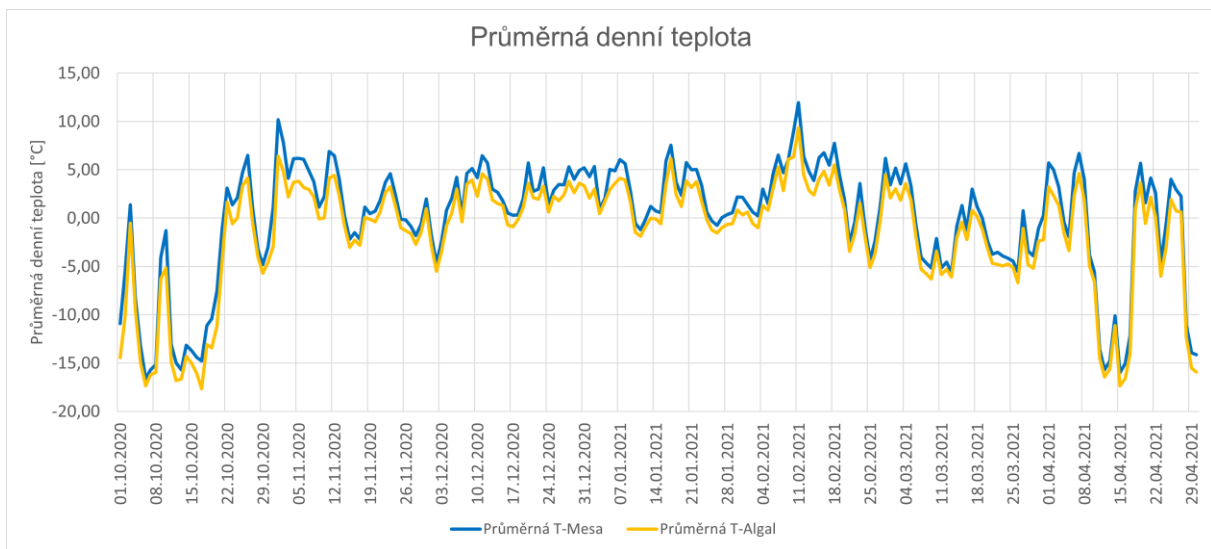
Obr. 13: Průměrná měsíční teplota vzduchu na zájmových lokalitách v období od 1. 10. 2020 až 30. 4. 2021

Nejnižší okamžitá teplota vzduchu byla naměřena stanicí (AMS) u lokality Johnson Mesa dne 15. 4. 2021 $-18,6\text{ °C}$ (Obr. 14). V rámci druhé lokality u toku Algal dne 17. 10. 2020 činila $-22,5\text{ °C}$. Naopak nejvyšší okamžitá teplota dosáhla na lokalitě Johnson Mesa dne 11. 2. 2021 $16,8\text{ °C}$ a na lokalitě toku Algal $13,1\text{ °C}$.

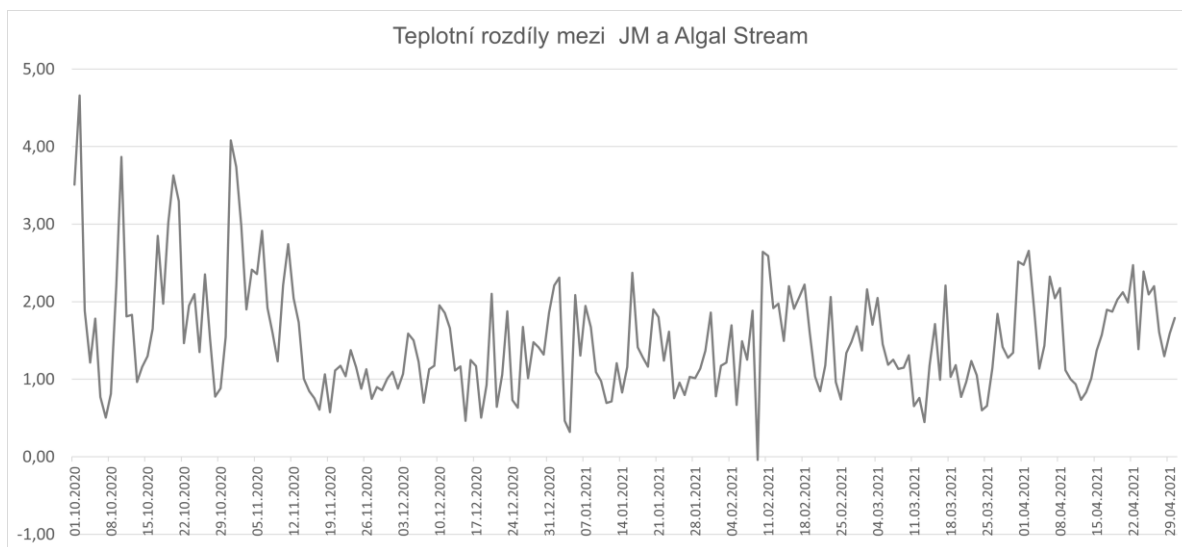
U průměrných denních teplot vzduchu za dané období vystoupala 11. 2. 2021 na $11,9\text{ °C}$ na automatické stanici úbočí Johnson Mesa a u Algalu dosáhla hodnota nejvyšší průměrné teploty téhož dne $9,3\text{ °C}$. Nejnižší průměrná teplota klesla 15. 4. 2021 na lokalitě úbočí plošiny Johnson Mesa k -16 °C a na lokalitě u toku Algal k $-17,4\text{ °C}$ (Obr. 15). Z těchto výsledků lze usuzovat, že amplituda teplot na lokalitách je podobná.



Obr. 14: Maximální a minimální denní teploty u obou studovaných lokalit–JM a Algal



Obr. 15: Průměrná denní teplota v rámci celé sezóny 2020/21 na AMS lokalitách v blízkosti sněžníků



Obr. 16: Rozdíl teplot vzduchu mezi lokalitami mezi lokalitami AMS u plošiny JM a toku Algal

První kladné teploty byly na obou lokalitách zaznamenány již na konci října, konkrétně od 22. 10. 2020. Nicméně vícedenní po sobě jdoucí kladné teplot, přesahující 0°C, byly zaznamenány až na začátku listopadu. Za počátek ablační sezóny tedy lze dle klimatických dat označit přelom října a listopadu. Při vymezení konce ablační sezóny byly zaznamenány alespoň 3denní shluky kladných teplot ještě koncem dubna (tj. do 27. 4. 2021) u obou studovaných lokalit.

Při porovnání klimatických dat z lokality JM a Algalu lze podotknout, že křivky průměrných denních teplot mají na obou lokalitách velice podobný průběh (Obr. 14). Největší teplotní rozdíly mezi lokalitami byly zaznamenány zejména v říjnu a v první polovině listopadu (Obr. 16).

5.5 Fáze akumulace

Na lokalitě erozní rýhy toku Algal lze identifikovat dvě výraznější období sněžení. První z nich začalo 6.března a trvalo přibližně 5 dní do 11.března. Druhá fáze akumulace nastala 10.dubna, kdy pravděpodobně nastalo 3denní sněžení vedoucí k následnému nárůstu výšky sněhové pokrývky. Je pozoruhodné, že v případě druhého období minimální denní teploty klesly až k -19 °C (Obr. 19).

Shodný začátek obou období sněžení lze pozorovat i na lokalitě na úbočí Johnson Mesa. Zde však tato období sněžení trvala vícero dní (Obr. 18). V první etapě sněžení se dle klimatických dat objevuje maximální denní teplota přesahující 0 °C, nicméně průměrné denní teploty se stále držely pod bodem mrazu a minimální

denní teploty dosahovaly ještě nižších teplot než na lokalitě toku Algal. Naproti tomu druhá etapa sněžení na sněžníku u JM je z hlediska teploty shodná s teplotami zaznamenanými na sněžníku toku Algal.

Kromě těchto dominantních období lze identifikovat i kratší epizody akumulace, např. 25. 2. 2021 na lokalitě toku Algal (Obr. 19) a 11. 2. 2021 na úbočí Johnson Mesa. Ačkoliv tyto epizody nejsou na první pohled tak zřetelné, mohou stále ukazovat přínos sněhových srážek formou akumulace, která zde střídá ablační procesy.



Obr. 17: Kumulované hodnoty změn výšky povrchu studovaných sněžníků

Při porovnání dvou studovaných sněžníků lze zaznamenat, že ačkoliv se sníh na obou lokalitách ukládal v přibližně shodném období, výška akumulovaného sněhu byla podstatně vyšší na lokalitě pod plošinou JM. Tento rozdíl mezi lokalitami tkví ve vlastnostech reliéfu daných sněžníků, přičemž sněžník na úbočí plošiny Johnson Mesa tvoří závětrný prostor plošiny, kde se sníh může snáze akumulovat. Naopak sněžník toku Algal, který tvoří rovinatější terén bez velkých překážek, podléhá procesu deflace.

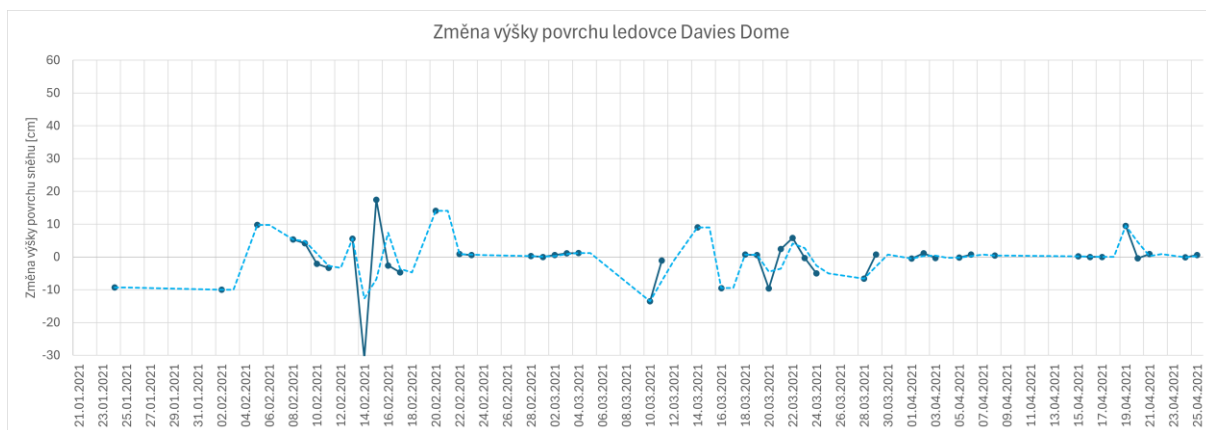
Změny výšky sněhu na povrchu ledovce Davies Dome, jenž se nachází ve vyšší nadmořské výšce, nejsou tak výrazné jako u sněžníků JM a toku Algal (Obr. 20).



Obr. 18: Změna výšky sněžníku úbočí Johnson Mesa, doplněna o klouzavý průměr (světle modrá přerušovaná linie)



Obr. 19: Změna výšky sněžníku toku Algal, doplněna o klouzavý průměr (světle modrá přerušovaná linie)



Obr. 20: Změna výšky ledovce Davies Dome, doplněna o klouzavý průměr (světle modrá přerušovaná linie)

6 DISKUSE

6.1 Faktory ovlivňující přesnost měření a zpracování dat

Správnost výsledků a relevantnost dat je závislá na mnoha faktorech, které je třeba v této práci zohlednit. Určitou míru chyby v řádech jednotek centimetrů může vykazovat ruční odečet hodnot ablace ze snímků z fotopasti, neboť existují dny, kdy odečet nelze provést vlivem nepříznivého počasí. Také kvalita snímků je limitem pro přesné stanovení hodnoty na stupnici.

Dalším významným faktorem je výměna ablačních tyčí během probíhající sezóny. V reakci na ablaci nebo vlivem jiného meteorologického jevu může docházet k tomu, že ablační tyče nevydrží zavrtané v ledu celou sezónu a vyvrátí se. Další postup poté spočívá ve využití tyče vedlejší, pokud se zde nachází. Při využívání jiné tyče na lokalitě je důležité zjistit, zda jsou segmenty na ablační tyči ve stejném měřítku, a zda z ní lze číst hodnoty stejným způsobem jako u tyče předchozí. K takové situaci došlo v jednom případě na lokalitě toku Algal. Zde byla využita stejná stupnice jako u předešlé tyče, neboť měla stejné segmenty.

V odchylkách odečtu je také třeba vzít v úvahu situaci, kdy prostor kolem tyče přímo na povrchu sněžníku vytaje a tyč je poté vodou vyplavena směrem nahoru. Toto se projeví nárůstem výšky tyče nad povrchem, což za normálních okolností značí výraznější nárůst ablace, která nemusela v tuto chvíli proběhnout. Tento případ nepřesnosti se stává ke konci funkčnosti tyče, kdy je tyč již krátká a vypadne z ledu. V této studii nastala výměna tyče na lokalitě toku Algal v polovině února, nicméně nezdá se, že by tato výměna měla negativní vliv na výsledky.

Pokud by se snímky z fotopastí pořídily ve větší kvalitě, bylo by možné odečítat změny výšky povrchu sněžníku v detailnějším měřítku, například v jednotkách milimetrů, čímž by se dal zpřesnit odečet hodnot ablace.

6.2 Abláční sezóna

Za začátek ablační sezóny byl dle klimatických dat označen přelom října a listopadu. V těchto měsících se měsíční průměrné teploty pohybovaly pouze v kladných hodnotách, což také souhlasí s výroky Lásky et al. (2010). Naopak konec ablační sezóny byl stanoven na konec dubna, kdy navzdory přetrvávajícím kladným

průměrný denní teplotám, byla již měsíční průměrná hodnota záporná. Tato charakteristika odpovídá období tání definovanému Hrbáčkem et al. (2019), kteří uvedli, že tání v oblasti ostrova Jamese Rosse obvykle probíhá od listopadu do března, což je v porovnání s výsledky předložené práce o měsíc dříve.

Konkrétně ledovec Davies Dome zaznamenal průměrnou roční ztrátu hmoty v období 2015/16–2020/21 $-0,15 \pm 0,13$ m w. e. (Engel et al. 2024), což odpovídá průměrné denní ztrátě $-0,41$ mm w. e. v letech 2015/16–2020/21. Změny v bilanci hmoty dosahovaly u ledovce Triangular za rok 2019/20 průměrně $-0,56 \pm 0,25$ m w.e. (Engel et al. 2023), tudíž přibližně $-1,53$ mm w. e. za den v roce 2019/20. Sezónní ablace ale v letních měsících pravděpodobně dosahovala vyšších hodnot úbytku než ve zbylé části roku. U zájmových sněžníků pouze v ablační sezóně 2020/21 činil denní úbytek u sněžníku toku Algal $-1,4$ cm.

V práci Engela et al. (2022) ukazuje studie u ledovce Triangular snížení povrchu od prosince 2021 do února 2022 o 146,5 cm, s průměrnou rychlostí $-1,7$ cm/den, což se v předložené práci přibližuje hodnotě na sněžníku Algal ($-1,4$ cm/den). Nejdelší období poklesu povrchu ledovce Triangular, během něhož došlo ke snížení o 96,7 cm, bylo zaznamenáno mezi 1. a 28. prosincem s průměrnou denní rychlostí poklesu 3,5 cm/den. Maximální denní ablace na ledovci Triangular dosáhla uprostřed léta (22./23. a 30./31. ledna) 10 cm. U studovaných sněžníků této práce byla zaznamenána maximální ablace -29 cm (19. 4. 2021) na sněžníku JM a -14 cm (19. 4. 2021) na sněžníku toku Algal.

Při interpretaci výsledků je třeba zohlednit vliv klimatických podmínek a charakter reliéfu. Expozice a sklon povrchu sněžníku, zastínění či větrný transport sněhu mohou intenzitu tání ovlivnit. U ledovce Triangular byla ztráta hmoty přičtena právě transportu sněhu větrem a zastínění skalní stěnou (Engel et al. 2023). Při porovnání stanovištních podmínek zájmových sněžníků, lze podotknout, že sněžník úbočí Johnson Mesa tvoří závětrný prostor pro snadnou akumulaci sněhu. Také tento sněžník leží ve větším sklonu (přibližně 9°) a je orientovaný na severovýchod. Sněžník erozní sníženiny toku Algal má rovinatější terén se sklonem do 5° bez výrazných překážek a podléhá spíše deflaci. Z hlediska expozice je orientován směrem na severozápad.

6.3 Vztah teploty a tání

V této práci byl analyzován vztah změn výšky povrchu sněhu s teplotními charakteristikami, přičemž vyšlo, že nejspolehlivějšími prediktory ablace jsou maximální denní teplota a PDD. Ze tří teplotních proměnných vykazuje ve vztahu k ablaci horší výsledky proměnná průměrné denní teploty. Podle studie Jonsell et al. (2012) se nízké korelační koeficienty vztahu mezi průměrnou teplotou a táním pro ledovce na ostrově Livingston, jenž je součástí Jižních Shetland, považují za indikátor, že modely tání založené pouze na teplotě vzduchu nejsou dostatečně účinné. Proto Jonsell et al. (2012) navrhuje použití modelů kombinujících teplotu a záření, což by mohlo lépe odrážet tání ledovců v okrajové části Antarktidy.

Podobně byla dána do kontextu s teplotními daty (PDD) hmotnostní bilance ledovce na ledovci Triangular za období 2014–2020 (Engel et al. 2023). V kontextu měnícího se klimatu dle Engela et al. (2023) čelil ledovec Triangular výraznému úbytku na konci 20. století, což odpovídá trendu oteplování v rámci oblasti Antarktického poloostrova. V období mezi lety 2006 až 2016, kdy došlo k ochlazení, tento ledovec zpomalil svůj ústup.

Podobně byla dána do kontextu ablace s průměrnou teplotou vzduchu v období 1985–1987 na ledovci Tasman Glacier, nacházející se v Jižních Alpách na Novém Zélandu (Kirkbride 1995). Ablace zde byla odečtena z ablačních tyčí v výškách 960 m n. m. a 1360 m n. m. a ve vztahu k teplotám vzduchu vyšla silná korelace. Ze studie také vyplývá, že největší vliv na ablaci ledovce měly letní teploty.

7 ZÁVĚR

V rámci rešerše odborné literatury byla popsána situace tání ledovců v okrajové části Antarktidy s následným zaměřením na ledovce sledované na ostrově Jamese Rosse, kde se nacházejí dva zájmové sněžníky s ablačními tyčemi. Předmětem následné analýzy byla data změn výšky povrchu sněžníků odečtená z fotografií ablačních tyčí a teplotní záznamy z automatických meteorologických stanic přepočítané na teplotní proměnné. Po provedení regresní analýzy vztahu změny výšky povrchu sněžníků a teplotních proměnných, bylo zjištěno, že maximální denní teplota i sumy pozitivních denních teplot jsou nejvhodnějšími prediktory pro ablaci. Při porovnání průměrné denní teploty a PDD s ablací, koeficienty determinace u těchto proměnných dosahovaly menších hodnot než v rámci maximální denní teploty.

Abláční sezóna začala v zájmové oblasti sněžníků na přelomu října a listopadu a končila koncem dubna. Od listopadu do února byly průměrné měsíční teploty na zájmových sněžnících kladné a proto bylo toto období označeno za nejteplejší. Naopak největší pokles teplot byl zaznamenán v dubnu, koncem letního období. V ablační části sezóny docházelo také k výraznějším epizodám sněžení, přičemž na obou lokalitách se objevily výraznější epizody od 6.března a poté od 10.dubna.

Srovnání změn povrchu sněhové pokrývky na zájmových lokalitách Algal, JM a ledovci DD ukázalo více výkyvů na sněžnících. Při porovnání dvou zájmových sněžníků vůči sobě, lze podotknout, že sněžník na úbočí Johnson Mesa dosahoval výraznějších extrémů, kdy největší denní ablace činila -29 cm a akumulace 53 cm. Za období od ledna do dubna 2021 došlo u sněžníku toku Algal k celkovému snížení povrchu o -123 cm, přičemž na lokalitě Johnson Mesa došlo k nárůstu povrchu sněhu o 76 cm.

Výsledky korelačních koeficientů vztahu ablance s teplotními proměnnými vyšly nejlépe u proměnné maximální denní teploty a PDD. Hodnoty průměrné denní teploty jsou srovnatelné s ostatními proměnnými, ale u sněžníku toku Algal vykazují nižší hodnotu korelačního koeficientu. Lze podotknout, že kromě chodu teplot zde zasahují i jiné faktory ovlivňující ablaci v prostředí sněžníků. V rešeršní části odborné literatury byly tyto faktory nastíněny a zmíněny, nicméně dále v průběhu práce nebyly

přímo ve výpočtech zahrnuty a práce byla zaměřena výhradně na hodnocení klimatických dat ze sezóny 2020/21.

V této práci byly vyhodnoceny výsledky na základě analýzy teplotních údajů, nicméně pro lepší vystižení podmínek tání sněhové pokrývky na povrchu zájmových sněžníků by bylo vhodné doplnit analýzy o data ostatních faktorů ovlivňující procesy tání.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Knihy a články

ABRAM, N. J., MULVANEY, R., WOLFF, E. W., TRIEST, J., KIPFSTUHL, S., TRUSEL, L. D., VIMEUX, F., FLEET, L., ARROWSMITH, C. (2013): Acceleration of snow melt in an Antarctic Peninsula ice core during the twentieth century. *Nature Geoscience*, 5, 6, 404–411.

AMBROŽOVÁ, K., LÁSKA, K. (2016): Změny teploty vzduchu na ostrově Jamese Rosse v kontextu Antarktického poloostrova. [The changes of air temperature on James Ross Island in the context of the Antarctic Peninsula]. September 2016.

ARMSTRONG, R. L., BRUN, E. (2008): Snow and Climate-Physical Processes Surface Energy Exchange and Modeling.

BASTIAS, J., CALDERÓN, M., ISRAEL, L., HERVÉ, F., SPIKINGS, R., PANKHURST, R., CASTILLO, P., FANNING, M., UGALDE, R. (2020): The Byers Basin: Jurassic-Cretaceous tectonic and depositional evolution of the forearc deposits of the South Shetland Islands and its implications for the northern Antarctic Peninsula. *International Geology Review*, 11, 62, 1467–1484.

BENN, D., EVANS, D. (2010): *Glaciers and Glaciation*.

BERTHIER, E., BRIS, R. Le, MABILEAU, L., TESTUT, L., RÉMY, F. (2009): Ice wastage on the Kerguelen Islands (49°S, 69°E) between 1963 and 2006. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 3, 114.

BORZOTTA, E., TROMBOTTO, D. (2004): Correlation between frozen ground thickness measured in Antarctica and permafrost thickness estimated on the basis of the heat flow obtained from magnetotelluric soundings. *Cold Regions Science and Technology*, 1–2, 40, 81–96.

BRAUN, M., HOCK, R. (2004): Spatially distributed surface energy balance and ablation modelling on the ice cap of King George Island (Antarctica). *Global and Planetary Change*, 1–4, 42, 45–58.

CAPE, M. R., VERNET, M., SKVARCA, P., MARINSEK, S., SCAMBOS, T., DOMACK, E. (2015): Foehn winds link climate-driven warming to ice shelf evolution

in Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 21, 120, 11,037-11,057.

CLEM, K. R., RENWICK, J. A., MCGREGOR, J., FOGT, R. L. (2016): The relative influence of ENSO and SAM on Antarctic Peninsula climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 4449, 175, 238.

DAVIES, B. J., CARRIVICK, J. L., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., SMELLIE, J. L. (2012): Variable glacier response to atmospheric warming, northern Antarctic Peninsula, 1988-2009. *Cryosphere*, 5, 6, 1031–1048.

DAVIES, B. J., GLASSER, N. F., CARRIVICK, J. L., HAMBREY, M. J., SMELLIE, J. L., NÝVLT, D. (2013): Landscape evolution and ice-sheet behaviour in a semi-arid polar environment: James Ross Island, NE Antarctic Peninsula. *Geological Society Special Publication*, 1, 381, 353–395.

DZIEMBOWSKI, M., BIALIK, R. J. (2022): The Remotely and Directly Obtained Results of Glaciological Studies on King George Island: A Review. *MDPI*, 14.

ENGEL, Z., LÁSKA, K., KAVAN, J., SMOLÍKOVÁ, J. (2023): Persistent mass loss of Triangular Glacier, James Ross Island, north-eastern Antarctic Peninsula. *Journal of Glaciology*, 273, 69, 27–39.

ENGEL, Z., LÁSKA, K., MATĚJKA, M., NEDĚLČEV, O. (2022): Effect of geotextile cover on snow and ice melt on Triangular Glacier, the north-eastern Antarctic Peninsula. *Czech Polar Reports*, 2, 12, 256–268.

ENGEL, Z., LÁSKA, K., NÝVLT, D., STACHOŇ, Z. (2018): Surface mass balance of small glaciers on James Ross Island, north-eastern Antarctic Peninsula, during 2009-2015. *Journal of Glaciology*, 245, 64, 349–361.

ENGEL, Z., LÁSKA, K., SMOLÍKOVÁ, J., KAVAN, J. (2024): Recent Change in Surface Mass-Balance Trends of Glaciers on James Ross Island, North-Eastern Antarctic Peninsula. *Journal of Glaciology*.

ENGEL, Z., NÝVLT, D. (2013): Reliéf a geomorfologický vývoj ostrova Jamese Rosse. In: PROŠEK, P. (ed.): *Antarktida*. Academia, Praha, s. 264–276.

ENGEL, Z., NÝVLT, D., LÁSKA, K. (2012): Ice thickness, areal and volumetric changes of Davies Dome and Whisky Glacier (James Ross Island, Antarctic Peninsula) in 1979-2006. *Journal of Glaciology*, 211, 58, 904–914.

FALK, U., LÓPEZ, D. A., SILVA-BUSSO, A. (2018): Multi-year analysis of distributed glacier mass balance modelling and equilibrium line altitude on King George Island, Antarctic Peninsula. *Cryosphere*, 4, 12, 1211–1232.

FARÍAS-BARAHONA, D., SOMMER, C., SAUTER, T., BANNISTER, D., SEEHAUS, T. C., MALZ, P., CASASSA, G., MAYEWSKI, P. A., TURTON, J. V., BRAUN, M. H. (2020): Detailed quantification of glacier elevation and mass changes in South Georgia. *Environmental Research Letters*, 3, 15.

GLOSER, J., PROŠEK, P. (2013): Vědecký potenciál prostoru ostrova Jamese Rosse a vědecké projekty. In: PROŠEK, P. (ed.): *Antarktida*. Academia, Praha, s. 242–244.

GOUDIE, A. (2004): Encyclopedia of geomorphology. *Choice Reviews Online*, 01, 42, 42-0027-42–0027.

HRBÁČEK, F., NÝVLT, D., LÁSKA, K., KŇAŽKOVÁ, M., KAMPOVÁ, B., ENGEL, Z., OLIVA, M., MUELLER, C. W. (2019): Permafrost and active layer research on James Ross Island: An overview. *Czech Polar Reports*, 1, 9, 20–36.

JAGOŠ, T. (2011): Teplotní poměry v severní části ostrova Jamese Rosse v letech 2005-2010. Masarykova univerzita.

JENNINGS, S. J. A., DAVIES, B. J., NÝVLT, D., GLASSER, N. F., ENGEL, Z., HRBÁČEK, F., CARRIVICK, J. L., MLČOCH, B., HAMBREY, M. J. (2021): Geomorphology of Ulu Peninsula, James Ross Island, Antarctica. *Journal of Maps*, 2, 17, 125–139.

JONSELL, U. Y., NAVARRO, F. J., BAÑÓN, M., LAPAZARAN, J. J., OTERO, J. (2012): Sensitivity of a distributed temperature-radiation index melt model based on AWS observations and surface energy balance fluxes, Hurd Peninsula glaciers, Livingston Island, Antarctica. *Cryosphere*, 3, 6, 539–552.

KAVAN, J., NÝVLT, D., LÁSKA, K., ENGEL, Z., KŇAŽKOVÁ, M. (2020): High-latitude dust deposition in snow on the glaciers of James Ross Island, Antarctica. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7, 45, 1569–1578.

KAVAN, J., ONDRUCH, J., NÝVLT, D., HRBÁČEK, F., CARRIVICK, J. L., LÁSKA, K. (2017): Seasonal hydrological and suspended sediment transport dynamics in

proglacial streams, James Ross Island, Antarctica. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 1, 99, 38–55.

KIRKBRIDE, M. P. (1995): Relationships between temperature and ablation on the Tasman Glacier, Mount Cook National Park, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1, 38, 17–27.

KNAP, W. H., OERLEMANS, J., CABÉE, M. (1996): Climate sensitivity of the ice cap of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 1, 23, 154–159.

LÁSKA, K., BARTÁK, M., HÁJEK, J., PROŠEK, P., BOHUSLAVOVÁ, O. (2011a): Climatic and ecological characteristics of deglaciated area of James Ross Island, Antarctica, with a special respect to vegetation cover. *Czech Polar Reports*, 1, 1, 49–62.

LÁSKA, K., BUDÍK, L., BUDÍKOVÁ, M., PROŠEK, P. (2011b): Method of estimating solar UV radiation in high-latitude locations based on satellite ozone retrieval with an improved algorithm. November 2014.

MARTIN, P. J., PEEL, D. A. (1978): The Spatial Distribution of 10 m Temperatures in the Antarctic Peninsula. *Journal of Glaciology*, 83, 20, 311–317.

MLČOCH, B., NÝVLT, D. (2013): Vulkanismus a zalednění prostoru ostrova Jamese Rosse. In: PROŠEK, P. (ed.): *Antarktida*. Academia, Praha, s. 253–264.

NÝVLT, D., BRAUCHER, R., ENGEL, Z., MLČOCH, B. (2014): Timing of the Northern Prince Gustav Ice Stream retreat and the deglaciation of northern James Ross Island, Antarctic Peninsula during the last glacial-interglacial transition. *Quaternary Research (United States)*, 2, 82, 441–449.

ONDRÁCKOVÁ, L., SURIAN, N., NÝVLT, D., STUHLÍK, R. (2020): Downstream variability of channel morphology and bed material in the braided Keller River, James Ross Island, Antarctica. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 2, 43, 195–207.

PĘTLICKI, M., SZIŁO, J., MACDONELL, S., VIVERO, S., BIALIK, R. J. (2017): Recent deceleration of the ice elevation change of Ecology Glacier (King George Island, Antarctica). *Remote Sensing*, 6, 9.

PROŠEK, P. (2013): *Antarktida*. Academia, Praha.

SEIBERT, J., JENICEK, M., HUSS, M., EWEN, T. (2015): Chapter 4 - Snow and Ice in the Hydrosphere. In: Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters. 99–137.

SPELLIE, J. L. (1999): Lithostratigraphy of Miocene-Recent, alkaline volcanic fields in the Antarctic Peninsula and eastern Ellsworth Land. *Antarctic Science*, 3, 11, 362–378.

STRINGER, C. D., BOYLE, J. F., HRBÁČEK, F., LÁSKA, K., NEDĚLČEV, O., KAVAN, J., KŇAŽKOVÁ, M., CARRIVICK, J. L., QUINCEY, D. J., NÝVLT, D. (2024): Quantifying sediment sources, pathways, and controls on fluvial transport dynamics on James Ross Island, Antarctica. *Journal of Hydrology*, April, 635.

SZAFRANIEC, J. (2002): Influence of positive degree-days and sunshine duration on the surface ablation of Hansbreen, Spitsbergen glacier. *Polish Polar Research*, 3–4, 23, 227–240.

SZIŁO, J., BIALIK, R. J. (2018): Recession and ice surface elevation changes of baranowski glacier and its impact on proglacial relief (King George Island, West Antarctica). *Geosciences (Switzerland)*, 10, 8.

TURNER, J., COLWELL, S. R., MARSHALL, G. J., LACHLAN-COPE, T. A., CARLETON, A. M., JONES, P. D., LAGUN, V., REID, P. A., IAGOVKINA, S. (2005): Antarctic climate change during the last 50 years. *International Journal of Climatology*, 3, 25, 279–294.

VAN DEN BROEKE, M. R., VAN LIPZIG, N. P. M. (2004): Changes in Antarctic temperature, wind and precipitation in response to the Antarctic Oscillation. *Annals of Glaciology*, June 2004, 39, 119–126.

VAN WESSEM, J. M., LIGTENBERG, S. R. M., REIJMER, C. H., VAN DE BERG, W. J., VAN DEN BROEKE, M. R., BARRAND, N. E., THOMAS, E. R., TURNER, J., WUITE, J., SCAMBOS, T. A., VAN MEIJGAARD, E. (2016): The modelled surface mass balance of the Antarctic Peninsula at 5.5 km horizontal resolution. *Cryosphere*, 1, 10, 271–285.

ZEMP, M., THIBERT, E., HUSS, M., STUMM, D., ROLSTAD DENBY, C., NUTH, C., NUSSBAUMER, S. U., MOHOLDT, G., MERCER, A., MAYER, C., JOERG, P. C., JANSSON, P., HYNEK, B., FISCHER, A., ESCHER-VETTER, H., ELVEHØY, H.,

ANDREASSEN, L. M. (2013): Reanalysing glacier mass balance measurement series. *Cryosphere*, 4, 7, 1227–1245.

ZVĚŘINA, O., LÁSKA, K., ČERVENKA, R., KUTA, J., COUFALÍK, P., KOMÁREK, J. (2014): Analysis of mercury and other heavy metals accumulated in lichen *Usnea antarctica* from James Ross Island, Antarctica. *Environmental Monitoring and Assessment*, 12, 186, 9089–9100.

Konferenční abstrakty

LÁSKA, K., NÝVLT, D., ENGEL, Z., BUDÍK, L. (2012): Seasonal variation of meteorological variables and recent surface ablation/accumulation rates on Davies dome and Whisky Glacier, James Ross Island, Antarctica. *Geophysical Research Abstracts*, April, 14, EGU2012-5545.

LÁSKA, K., PROŠEK, P., BUDÍK, L. (2010): Seasonal variation of air temperature at the Mendel Station, James Ross Island in the period of 2006-2009. *Geophysical Research Abstracts*, 12, EGU2010-3880.

Mapy a atlasy

Česká geologická služba (2010): Ostrov Jamese Rosse - severní část. Topografická mapa 1 : 25 000. Česká geologická služba, Praha.

Česká geologická služba (2020): Geologická mapa ostrova Jamese Rosse - severní část. Topografická mapa 1 : 25 000. Česká geologická služba, Praha.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Typické rozmezí hodnot povrchového albeda (zdroj: Armstrong a Ross, 2008, s.5).....	12
Obr. 2: Graf teplotních proměnných (AT=průměrná roční teplota, PDD=suma pozitivních denních stupňů, DJF=letní teploty vzduchu) na stanici Johana Gregora Mendela v období 2009/10–2020/21 (zdroj: Engel et al. 2024).....	16
Obr. 3: Severní část poloostrova Ulu s viditelným nejsevernějším výbežkem ostrova a stanicí Johana Gregora Mendela (foto: Engel)	17
Obr. 4: Severní část poloostrova Ulu se znázorněnými lokalitami studovaných sněžníků a automatických meteorologických stanic (z dat: ČGS, 2009)	18
Obr. 5: a) Lokalita v severním úbočí plošiny Johnson Mesa, b) Lokalita erozní rýhy toku Algal (foto: Engel)	19
Obr. 6: Charakteristická krajina ostrova Jamese Rosse, lze zde vidět typické stolové hory nebo ledovcové kary (foto: doc. RNDr. Zbyněk Engel, Ph.D.).....	22
Obr. 7: Mapa znázorňující polohu Davies Dome vůči zájmovým lokalitám (JM a Algal), (z dat ČGS, 2009)	26
Obr. 8: a) Lokalita v severním úbočí plošiny Johnson Mesa s fotopastí, ablační tyčí a meteostanicí, b) Lokalita erozní rýhy toku Algal s ablační tyčí, c) lokalita na úbočí Johnson Mesa s ablační tyčí 12. 3. 2021.....	27
Obr. 9: Změna výšky povrchu studovaných sněžníků	31
Obr. 10: Regresní analýzy pro vztah teplotních proměnných lokalit úbočí Johnson Mesa	32
Obr. 11: Regresní analýzy pro vztah teplotních proměnných v rámci lokality erozní rýhy Algal Stream	34
Obr. 12: Porovnání změn výšky povrchu sněžníků studovaných lokalit a referenčního ledovce Davies Dome	36
Obr. 13: Průměrná měsíční teplota vzduchu na zájmových lokalitách v období od 1. 10. 2020 až 30. 4. 2021.....	38
Obr. 14: Maximální a minimální denní teploty u obou studovaných lokalit–JM a Algal	39
Obr. 15: Průměrná denní teplota v rámci celé sezóny 2020/21 na AMS lokalitách v blízkosti sněžníků.....	39

Obr. 16: Rozdíl teplot vzduchu mezi lokalitami mezi lokalitami AMS u plošiny JM a toku Algal	40
Obr. 17: Kumulované hodnoty změn výšky povrchu studovaných sněžníků	41
Obr. 18: Změna výšky sněžníku úbočí Johnson Mesa, doplněna o klouzavý průměr (světle modrá přerušovaná linie)	42
Obr. 19: Změna výšky sněžníku toku Algal, doplněna o klouzavý průměr (světle modrá přerušovaná linie).....	42
Obr. 20: Změna výšky ledovce Davies Dome, doplněna o klouzavý průměr (světle modrá přerušovaná linie).....	42

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Souřadnice automatických meteorologických stanic (stanice Lagos byla před zimou přesunuta mimo dosah lavin, cca o 30 m k SV)	25
Tab. 2: Dny, pro které chybí záznam změny povrchu sněžníku	28
Tab. 3: Hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu vztahu změny výšky povrchu s teplotními charakteristikami	35
Tab. 4: Hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu vztahu ablace s teplotními charakteristikami (bez nulových a záporných hodnot)	35

SEZNAM ZKRATEK

AP – Antarktický poloostrov

AMS – automatická meteorologická stanice

DD – Davies Dome

JM –Johnson Mesa

PDD – positive degree days

