

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Aplikovaná geografie se zaměřením na fyzickou geografii



Daniel Běhounek

Poloha a morfologie půdních kopečků a jejich vztah k environmentálním podmínkám

Situation and morphology of earth hummocks and their relationship to environmental conditions

Bakalářská práce

Vedoucí práce/Školitel:
RNDr. Marek Křížek, Ph.D.

Praha, 2025

Poděkování

Zde bych rád upřímně poděkoval vedoucímu této práce, RNDr. Marku Křížkovi Ph.D. za vedení práce, poskytnutí potřebné literatury a celkovou pomoc, kterou mi v průběhu zpracování poskytl.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 25. 4. 2025

Daniel Běhounek

Abstrakt

Půdní kopečky, označované jako thufury, představují významné periglaciální geomorfologické tvary, jejichž vznik a vývoj jsou dodnes předmětem intenzivního výzkumu. Ačkoli byly tyto tvary popsány v různých klimatických a geografických podmínkách, mechanismy jejich formování zůstávají ne zcela jednoznačně objasněné. Primárními procesy považovanými za příčinu jejich vzniku jsou kryoturbace, kryoexpulze klastů, buněčná cirkulace a působení hydrostatického či kryostatického tlaku, přičemž se předpokládá, že tyto procesy často působí ve vzájemné kombinaci. Thufury byly zaznamenány jak v oblastech s permafrostem, tak i v regionech bez něj, od arktických nížin až po alpské oblasti v blízkosti rovníku. Jejich geografické rozšíření tak ukazuje, že klíčovou roli při jejich vzniku hrají především specifické klimatické a půdní podmínky, spíše než samotná zeměpisná šířka či nadmořská výška.

Cílem této práce je analyzovat vztahy mezi morfometrickými charakteristikami thufurů, jejich klimatickým a geografickým kontextem a určit hlavní faktory, které ovlivňují jejich velikost a tvar. Za tímto účelem byly využity různé statistické metody včetně analýzy rozptylu (ANOVA), korelační analýzy a shlukové analýzy. Analýza rozptylu byla využita pro ověření statisticky významných rozdílů mezi skupinami lokalit na základě environmentálních parametrů, zatímco korelační analýza umožnila odhalit vztahy mezi polohovými proměnnými, morfometrickými charakteristikami thufurů a vybranými klimatickými faktory. Shluková analýza pak umožnila seskupit lokality podle jejich komplexních charakteristik a odhalit vnitřní strukturu celého souboru thufurů, které byly popsány v literatuře. Tato kombinace přístupů umožňuje nejen detailní pohled na prostorové a klimatické rozložení thufurů, ale také poskytuje nové poznatky o procesech, které jejich vznik a vývoj podmiňují.

Klíčová slova: Thufur, Morfometrie, Periglaciální geomorfologie, Metaanalýza, Enviromentální podmínky

Abstract

Earth hummocks, also known as thufurs, represent significant periglacial geomorphological features whose formation and development remain the subject of intensive research. Although these features have been described in various climatic and geographical conditions, the mechanisms behind their formation are still not fully understood. The primary processes considered responsible for their origin include cryoturbation, cryoexpulsion of clasts, cellular circulation, and the action of hydrostatic or cryostatic pressure, with the assumption that these processes often act in combination. Thufurs have been recorded both in areas with permafrost and in regions without it, ranging from Arctic lowlands to alpine areas near the equator. Their geographical distribution indicates that specific climatic and soil conditions, rather than latitude or altitude alone, play a key role in their formation.

The aim of this study is to analyze the relationships between the morphometric characteristics of thufurs, their climatic and geographic context, and to identify the main factors influencing their size and shape. For this purpose, various statistical methods were employed, including analysis of variance (ANOVA), correlation analysis, and cluster analysis. The analysis of variance was used to test for statistically significant differences between groups of sites based on environmental parameters, while correlation analysis reveal relationships between positional variables, morphometric characteristics of thufurs, and selected climatic factors. Cluster analysis was then applied to group the sites based on their complex characteristics and to uncover the internal structure of the whole dataset of thufurs that has been described in literature. This combination of approaches provides not only a detailed view of the spatial and climatic distribution of thufurs but also offers new insights into the processes that govern their formation and development.

Key words: Thufur, Morphometry, Periglacial geomorphology, Meta-analysis, Enviromental conditions

Obsah

1.	Seznam obrázků	7
2.	Seznam tabulek	8
3.	Úvod	10
3.1.	Definice a charakteristika	10
3.2.	Geneze thufuru	13
3.2.1.	Diferenciální mrazový zdvih (kryoturbace)	13
3.2.2.	2. Mrazový zdvih klastů	14
3.2.3.	Model buněčné cirkulace (rovnovážný model)	14
3.2.4.	Hydrostatický a kryostatický tlak	15
3.3.	Geografické rozšíření	16
4.	Metodika	17
4.1.	Metody sběru dat	17
4.2.	Výpočet základních statistických charakteristik	19
4.3.	Výpočet charakteristik variability	19
4.4.	Výpočet míry vazeb mezi charakteristikami	20
4.5.	Klasifikace objektů	20
5.	Výsledky	21
5.1.	Polohové a klimatické charakteristiky lokalit s thufury	21
5.1.1.	Polohové charakteristiky lokalit s výskytem thufurů	22
5.1.2.	Klimatické charakteristiky lokalit s výskytem thufurů	24
5.2.	Morfometrické charakteristiky thufurů	24
5.3.	Vazby mezi polohovými, klimatickými a morfometrickými charakteristikami thufurů 25	
5.4.	Analýza rozptylu a testování rozdílů mezi skupinami	26
5.4.1.	Morfometrické charakteristiky v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa ...	26
5.4.2.	Klimatické charakteristiky v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa	27
5.4.3.	Polohové charakteristiky v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa	28
5.4.4.	Polohové charakteristiky v závislosti na orientaci svahu	29
5.4.5.	Klimatické charakteristiky v závislosti na orientaci svahu	30

5.4.6.	Morfometrické charakteristiky v závislosti na orientaci svahu	31
5.5.	Klasifikace lokalit pomocí shlukové analýzy	32
5.5.1.	Morfometrické shluky	32
5.5.2.	Klimatické shluky	34
5.5.3.	Kategorie podobnosti na základě vzájemně nekorelujících charakteristik (shluky na bázi)	36
6.	Diskuse	38
6.1.	Polohové charakteristiky lokalit s výskytem thufurů	38
6.2.	Vztahy mezi enviromentálními charakteristikami a morfometrickými ukazateli	40
6.3.	Souvislosti enviromentálních charakteristik s polohovými proměnnými	40
6.4.	Kategorizace geografické polohy na základě morfometrických proměnných	41
6.5.	Klimatická kategorizace thufurů	42
6.6.	Kategorizace shluků na bázi.....	42
7.	Závěr.....	43
8.	Seznam literatury.....	45
8.1.	Další použité zdroje	48
9.	Přílohy	49

1. Seznam obrázků

Obrázek 1: thufurové pole na Islandu (Schunke a Zoltai, 1988)	10
Obrázek 2: Schématický řez thufury v prostředí permafrostu (Tarnocai a Zoltai, 1978), upraveno, počestěno.	11
Obrázek 3: Řez thufurem na Islandu. V centru můžeme pozorovat ledové jádro, čočku (Schunke a Zoltai, 1988).	14
Obrázek 4: Schématické zobrazení všech čtyř teorií o vzniku thufurů (Grab, 2005a, upraveno, počestěno).	15
Obrázek 5: Mapa rozšíření thufurů, oranžově body značí lokality výskytu (tab. 16), upraveno.	21
Obrázek 6: Krabicový diagram rozložení zeměpisných šířek.	22
Obrázek 7: Krabicový diagram rozložení nadmořských výšek.	22
Obrázek 8: Graf průměrů pro hlavní osu thufuru.	26
Obrázek 9: Graf průměrů pro vedlejší osu thufuru v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa.	26
Obrázek 10: Graf průměrů pro výšku thufuru v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa. ...	26
Obrázek 11: Graf průměrů pro letní průměrné teploty vzduchu.	27
Obrázek 12: Graf průměrů pro zimní průměrné teploty vzduchu v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa.	27
Obrázek 13: Graf průměrů pro průměrné roční teploty vzduchu v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa.	27
Obrázek 14: Graf průměrů pro nadmořskou výšku lokality s výskytem thufurů v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa.	28
Obrázek 15: Shluky lokalit thufurů dle morfologických charakteristik délka obou os, výška a protažení thufuru.	33
Obrázek 16: Shluky lokalit thufurů na základě MAAT, MAWT, MAST, teplot pod nulou a úhrnu srážek.	35
Obrázek 17: Shlukování lokalit studovaných thufurů na základě délky vedlejší osy, zeměpisné šířky dané lokality, průměrného ročního úhrnu srážek, sklonu svahu a protažení thufuru, neprokorelovaných charakteristik báze.	37

2. Seznam tabulek

Tabulka 1: Seznam zkoumaných parametrů a jejich definice.	17
Tabulka 2: Polohové charakteristiky lokalit s thufury.	22
Tabulka 3: Procentuální zastoupení orientací svahů s výskytem thufurů.	22
Tabulka 4: Klimatické charakteristiky lokalit s výskytem thufurů.	23
Tabulka 5: Morfometrické charakteristiky lokalit s výskytem thufurů.	24
Tabulka 6: Významné korelační vztahy v rámci datového souboru.	25
Tabulka 7: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a nadmořské výšky. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.	28
Tabulka 8: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a sklonu svahu. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.	29
Tabulka 9: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a průměrné roční teploty vzduchu. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.	29
Tabulka 10: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a průměrného ročního úhrnu srážek. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.	30
Tabulka 11: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a hlavní osy thufuru. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.	30
Tabulka 12: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a vedlejší osy thufuru. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.	31
Tabulka 13: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a výšky thufuru. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.	31
Tabulka 14: Kategorie podobností na základě morfologických charakteristik délka obou os, výška a protažení thufuru.	32
Tabulka 15: Kategorie podobností na základě MAAT, MAWT, MAST, teplot pod nulou a úhrnu srážek.	33

Tabulka 16: Kategorie podobností na základě vzájemně nekorelujících charakteristik délka vedlejší osy, zeměpisná šířka dané lokality, průměrný roční úhrn srážek, sklon svahu a protažení thufuru.	36
Tabulka 17: Morformetrické charakteristiky lokalit s výskytem thufurů s vyčleněním lokalit s minimální výškou thufuru nižší, než 10 cm.	38

3. Úvod

Půdní kopečky jsou krajinným prvkem vyskytujícím se v periglaciálním klimatu. Jónsson (1909), Gruner (1912) a Thoroddsen (1913) byli prvními, co popsali tyto tvary při terénním výzkumu na Islandu. Samotný termín „thufur“ je původem z islandštiny a označuje plurál vegetací pokrytých kopečků, singulárním tvarem tohoto slova je „thufa“ (Grab, 2005a). Sharp (1942) byl prvním, kdo použil pojem „earth hummock“ (půdní kopeček). Termín jim užitý popisuje tvary morfologicky velmi podobné islandským thufurům v oblasti pohoří St. Elias v severní Americe. Washburn (1956) definoval půdní kopeček jako „konkrétní typ netříděných sítí charakteristický svým tří dimenzionálním, boulovitým tvarem a vegetačním pokryvem“ (Grab, 2005a). V oblasti Fennoskandie se lze setkat s pojmem „pounus“, který se užívá k označení rašelinových kopečků (Luoto a Seppälä, 2002). V odborné literatuře se dále lze setkat s pojmy jako „tussock rings“, „frost hummocks“, „turf hummocks“, „soil hummocks“ či „earth grass mounds“ a mnoha dalšími. Všechny tyto pojmy jsou však používané k popisu tvarů morfologicky podobným thufurům (Grab, 2005a). Označení půdní kopeček je často asociováno s výskytem permafrostu, zatímco pojem thufur často označuje podobné tvary vzniklé bez spolupůsobení věčně zmrzlé půdy (Grab, 2005a). Pro účely této práce budou všechny tyto pojmy brány jako rovnocenné a označující stejný tvar reliéfu.

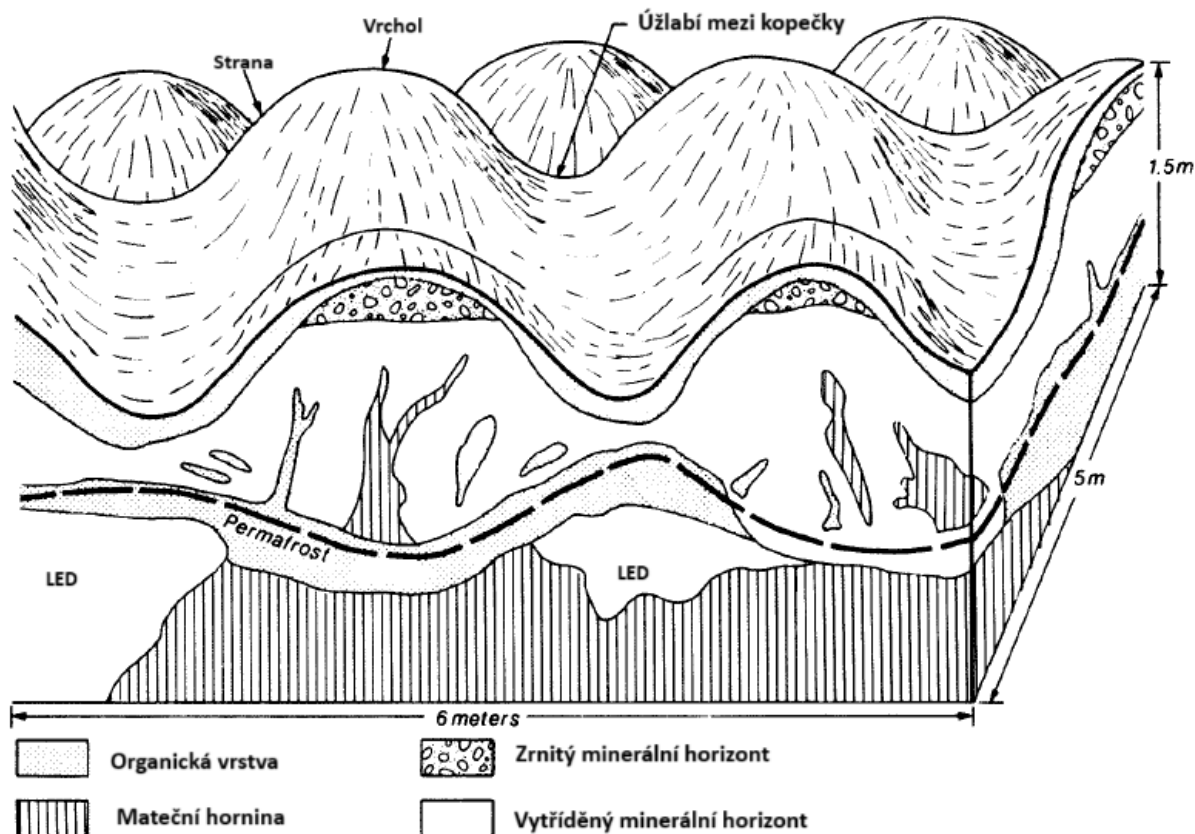
3.1. Definice a charakteristika

Schunke a Zoltai (1988) popisují půdní kopečky jako kruhové, či oválné tvary jejichž výška je v průměru 50 cm, zatímco bazální diametr je ve většině případů blízký 100 cm. Vyskytují se ve skupinách oddělených úzkými úžlabími, kde je vzdálenost mezi jednotlivými thufury většinou menší než poloměr těchto kopečků. Tyto skupiny Schunke a Zoltai (1988) nazývají thufurová pole (obr.1).



Obrázek 1: thufurové pole na Islandu (Schunke a Zoltai, 1988)

Půda, na níž se thufury často vyskytují, bývá dobře vytřídění s nedokonalým odvodněním, obvykle bez přebytečné vody na povrchu, a má nejčastěji vulkanicko-eolický, limnický či glaciální původ. Schunke a Zoltai (1988) popsali výskyt thufurů na mírných svazích o sklonu menším, než 6° . Výskyt thufurů byl popsán i na svazích o sklonu větším, než 8° (Lewkowicz, 2011). Pokud je sklon svahu vyšší, začnou se kopečky protahovat ve směru spádnic, nevyskytují se na svazích se sklonem větším, než 25° (Grab, 2005a). Bývají pokryty vegetací, i když ve vysoké Arktidě mohou být i holé. Hloubka výskytu permafrostu, pokud je v dané lokalitě přítomný, tvoří zrcadlový obrazem topografie povrchu (obr. 2). Hladina tak odděluje část činné vrstvy od trvale zmrzlé části thufuru (Tarnocai a Zoltai, 1978). V oblastech bez permafrostu roste rozdílná vegetace na kopečkách a mezi nimi převážně z důvodů odlišného množství dostupné podzemní vody, což je způsobeno mikro reliéfem (Schunke a Zoltai, 1988). Tato různorodost se podílí na variaci výživových cyklů (Biasi et al., 2005). Takto různorodý mikroreliéf, díky kterému existují rozdíly jak ve výšce, tak ve vlhkostním gradientu, výrazně ovlivňuje výživovou dynamiku, přerozdělování živin a ukládání organické hmoty (Biasi et al., 2005). Tarnocai a Zoltai (1978) pozorovali v arktické Kanadě, že v thufurech vyvinutých na permafrostu dochází k zrnitostní segregaci, přičemž zrnitý minerální horizont bývá vyneseno do temenní části thufuru (obr. 2).



Obrázek 2: Schématický řez thufury v prostředí permafrostu (Tarnocai a Zoltai, 1978), upraveno, počestěno.

Jak již bylo zmíněno, půda, na níž kopečky vyrůstají, je dobře vytříděná s dominancí jílových částic (58-99% v Kanadě, 60% na Islandu) a zbytek bývá jemný písek (Tarnocai a Zoltai, 1978). Uvnitř kopečků nejsou vyvinuté duté prostory, i když půda kolem kořenů rostlin bývá volněji strukturována. Hustota minerálních půd v kopečcích má velmi široký rozsah (1,00-2,18 g/cm²), což je pro půdy ovlivněné krypturbačí běžné (Schunke a Zoltai, 1988). V oblastech oceánského klimatu, kde je dostatek srážek, mají kopečky homogenní rozložení vlhkosti, ovšem v oblastech s kontinentálním klimatem je půdní vlhkost nižší v okrajových oblastech a zvyšuje se směrem do středu kopečku (Schunke a Zoltai, 1988).

Degradace thufuru může být způsobena fluvialní, či eolickou činností, stejně tak aktivitou zvíře (Grab, 2005a). Vliv na degradaci má také vegetace, která může způsobit akumulaci sněhu, což zamezuje řádnému promrznání a její kořeny také mechanicky poškozují jeho těleso (Tremel a Křížek, 2006). Sněhová pokrývka v místě výskytu thufurů hraje také důležitou roli. Pokud je sněhu málo, je půda vystavena rychlejšímu promrznání, což urychluje jejich růst. Faktor izolačních vlastností sněhu může být výhodný, když z jara zamezuje rychlému rozmrznání půdy, ale na druhé straně může přílišná sněhová pokrývka svými izolačními vlastnostmi zabránit dostatečnému promrznutí podloží v průběhu zimy (Schunke a Zoltai, 1988).

3.2. Geneze thufuru

Vznik těchto periglaciálních tvarů není doposud zcela objasněn. Za primární mechanismus jejich formování je považována tzv. kryoturbace, při níž dochází k opakovanému střídání cyklů zamrznání a tání, což způsobuje vertikální pohyb půdních částic směrem vzhůru. Počátek tohoto procesu může být iniciován migrací vlhkosti k mrazové frontě, přičemž se společně s vodou přesouvají i jemné částice půdy (Schunke & Zoltai, 1988). Tento mechanismus podporuje akumulaci minerálního i organického materiálu ve vznikajících kopečcích, které, pokud nedojde k narušení tohoto procesu, mohou dosáhnout výšky až jednoho metru. Důležitými faktory, které umožňují vznik půdních kopečků je obsah půdní vlhkosti, protože bez té by nemohlo docházet k pravidelným změnám objemu způsobených cykly mrznutí a tání, složení půdy a v neposlední řadě vegetační pokryv (Tremel, Křížek and Engel, 2010). Druh vegetačního pokryvu hraje zásadní roli zejména ve vztahu k dlouhověkosti a strukturální integritě kopečků (Grunei, 2015). Mezi typické znaky aktivních thufurů patří rozpůlené nebo praskající vrcholky a popraskaná půda v jejich okolí, což odráží vnitřní napětí v důsledku objemových změn v jejich jádru.

Jak již bylo uvedeno, přesný mechanismus vzniku těchto geomorfologických tvarů není jednoznačně objasněn. Ačkoli byly popsány jednotlivé faktory, které formování thufurů umožňují, procesy vedoucí k jejich prostorové organizaci do thufurových polí a přeměně původně rovinného terénu zůstávají předmětem vědecké diskuse. Dlouhou dobu bylo jejich formování spojováno výhradně s přítomností permafrostu, tato představa však neodpovídá nálezům thufurů i v oblastech bez trvale zmrzlé půdy.

Současný výzkum upřednostňuje model, který předpokládá kombinaci více procesů. Převládají čtyři základní teorie, které pravděpodobně působí ve vzájemné součinnosti (Grab, 2005a):

1. Diferenciální mrazový zdvih (kryoturbace) – vertikální pohyby půdy způsobené nerovnoměrným zamrznáním.
2. Mrazový zdvih klastů – vytlačování větších úlomků směrem vzhůru v důsledku mrazu.
3. Modely buněčné cirkulace – rovnovážné proudění materiálu v rámci půdního objemu.
4. Hydrostatický a kryostatický tlak – vnitřní napětí způsobené vodou v kapilárách během mrazu.

Je pravděpodobné, že tyto procesy nepůsobí odděleně, ale podílejí se společně na komplexním formování thufurů v závislosti na lokálních podmínkách prostředí. Zde jsou představeny jednotlivé základní teorie vzniku thufuru:

3.2.1. Diferenciální mrazový zdvih (kryoturbace)

Tento dnes nejčastěji přijímaný model vysvětluje vznik thufurů jako důsledek rozdílů v půdní teplotě a vlhkosti, které iniciují nerovnoměrné promrznání půdního profilu a následné vertikální pohyby půdních částic. Beskow (1930) předpokládal, že odlišné texturní složení

půdy a rozdílné vlastnosti vegetačního pokryvu způsobují vznik kryoturbačních jevů, které vytvářejí podmínky příznivé pro růst kopečků právě v těchto kontrastních místech.

Schunke (1977) dále poukazuje na to, že jakmile jsou malé kopečky jednou zformovány, jejich vegetační kryt zajišťuje izolaci od okolního prostředí, což mění teplotní režim v jejich nitru a vede k směřování laterálního (bočního) tlaku směrem ke středu kopečku, čímž dochází k jeho dalšímu vertikálnímu růstu.

Nedávné studie potvrzují, že kryoturbační představuje klíčový mechanismus formování thufurů, i když jemné variace ve složení půdy (např. podíl jílovitých a organických částí) mohou významně ovlivnit rychlost i charakter růstu (Grab, 2005a).

3.2.2. 2. Mrazový zdvih klastů

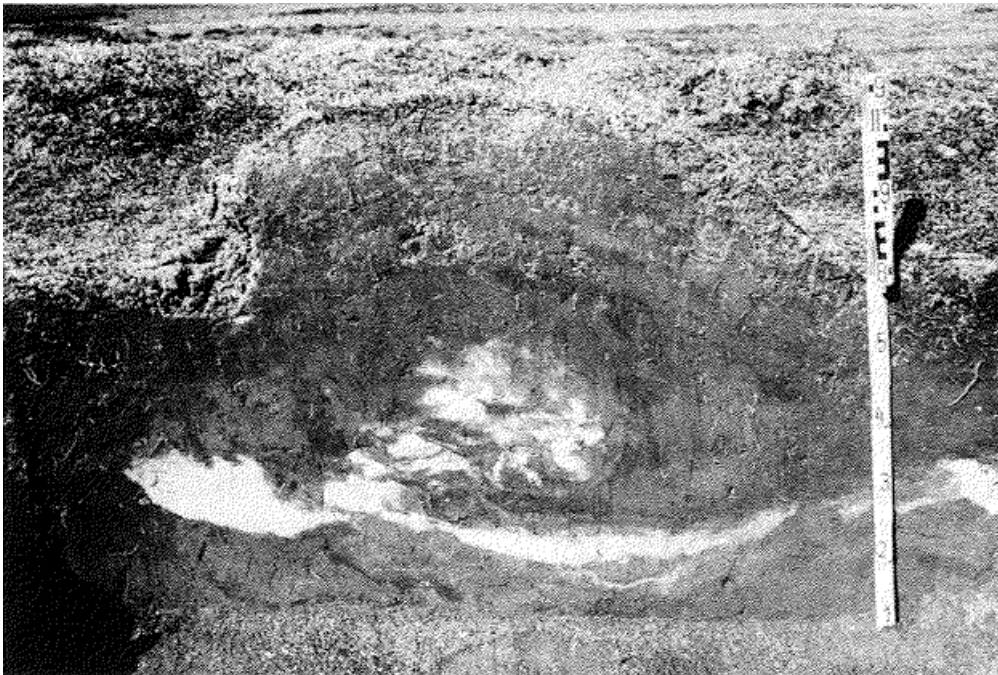
Ačkoli se thufury obvykle formují v dobře vyčíslených půdách s minimálním obsahem klastů, Dionne (1966) navrhl teorii, podle níž může docházet k vertikálnímu pohybu jednotlivých klastů směrem k povrchu půdy v důsledku opakovaných cyklů mrznutí a tání. Tento mechanismus je označován jako mrazový zdvih klastů (frost heave of clasts). Proces lze ilustrovat následovně: led vznikající pod klastem je každým cyklem mírně nadzvedne, a když led roztaje, kámen neklesne zpět do původní pozice, protože prostor pod ním může být mezitím vyplněn okolním materiálem. Takto může dojít k postupnému vytlačení kamene k povrchu.

Tento mechanismus může vést ke vzniku vegetací pokrytých kopečků s kamenným jádrem, jejichž povrch je často narušen pukáním vegetace v důsledku obnažení klastů. Takové útvary byly pozorovány např. v pohoří Lesotha a ve finském Laponsku. Významný experiment podporující tuto teorii provedl Anderson (1988), který ukázal, že mrazová fronta postupuje rychleji skrze kámen než skrze okolní půdu, což způsobuje vznik dutiny pod klastem. Tato dutina je následně vyplněna okolním materiálem, čímž se kámen trvale posouvá vzhůru. Ačkoliv je mrazový zdvih spíše výjimečným mechanismem při formování thufurů, nelze ji zcela opomíjet – zejména v prostředích s přítomností klastického materiálu a výraznou dynamikou zamrzání a tání (Grab, 2005a).

3.2.3. Model buněčné cirkulace (rovnovážný model)

Mackay (1980) navrhl alternativní model formování thufurů, založený na cirkulaci půdních buněk vyvolané gravitačními silami. V tomto modelu hrají klíčovou roli ledové čočky (obr. 3), které se formují v dolních částech činné vrstvy půdy, tedy v oblasti, kde během roku dochází k opakovanému zamrzání a rozmrzání. Při tání ledových čoček dochází k jejich poklesu, což vyvolává pomalou vertikální i horizontální cirkulaci půdy, podobnou proudění. Na rozdíl od jiných modelů tento předpokládá, že pohyb půdních částic není řízen kryostatickým tlakem, ale spíše gravitačními silami v kombinaci s rozdílnou hustotou půdních složek.

Volná konvekce v půdním prostředí je podle této teorie umožněna změnami hustoty během tání – tedy při přechodu z tuhého na kapalné skupenství. Tento proces by mohl vést ke střídavému zvedání a poklesu určitých oblastí půdy, což by postupně mohlo vést k formování boulovitých tvarů jako jsou thufury. Ačkoli tento model nabízí zajímavý pohled na vznik kopečků v periglaciálním prostředí, jeho potvrzení dosud postrádá dostatek laboratorních a terénních důkazů. Grab (2005a) proto zdůrazňuje potřebu dalšího výzkumu, který by detailně ověřil možnost buněčné cirkulace jako významného formujícího mechanismu.



Obrázek 3: Řez thufurem na Islandu. V centru můžeme pozorovat ledové jádro, čočku (Schunke a Zoltai, 1988).

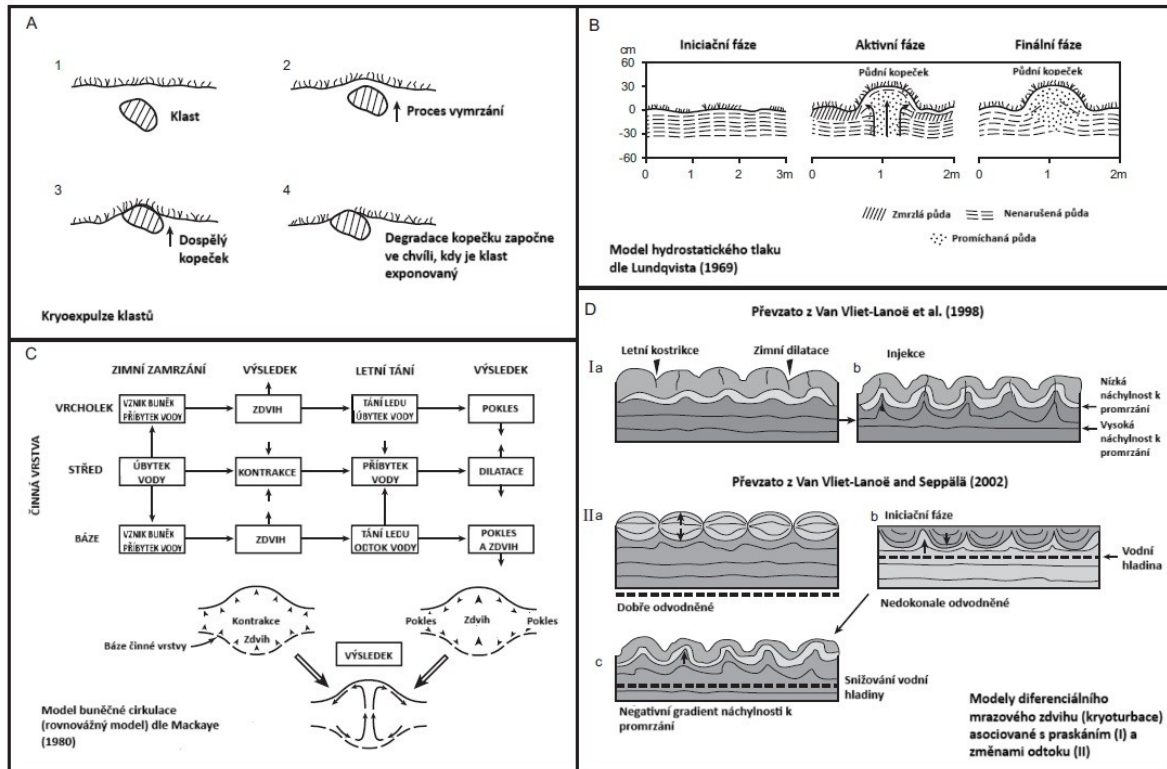
3.2.4. Hydrostatický a kryostatický tlak

Modely založené na hydrostatickém tlaku předpokládají, že pohyb velmi jemnozrnných, vodou saturovaných půd směrem vzhůru může být způsoben nerovnoměrnou rychlostí tání jednotlivých vrstev půdy nebo kolísáním hladiny podzemní vody. Tento tlak může v určitých případech vést k vertikálnímu přemístění půdního materiálu, zejména v prostředí s vysokým obsahem jemných frakcí. Washburn (1956) však upozornil, že tento mechanismus není běžně přítomen ve všech typech strukturních půd, a jeho význam je omezen především na prostředí, kde dochází k zamrznání půdy směrem z povrchu dolů – tedy bez vnitřního přísunu tepla z podloží.

Naopak modely kryostatického tlaku popisují situaci, kdy postupující mrazová fronta z povrchu směrem dolů uvězní vlhkost v nezamrzlých částech půdního profilu. S pokračujícím promrzáním se tlak na tuto vlhkost zvyšuje a voda je vytlačována do míst s nejmenším odporem, kde dochází k jejímu opětovnému zamrznání – tento proces může vytvářet tlakové síly schopné nadzvednout povrchové vrstvy. Ačkoli byly některé aspekty těchto modelů potvrzeny terénními experimenty, celkový vliv hydrostatického a kryostatického tlaku na

vznik thufurů je považován za spíše okrajový. Studie ukazují, že pohyb vody v půdním profilu může vést k vysychání půdy, což následně snižuje její plasticitu. Tento proces uvolňuje nahromaděný tlak a místo formování kopečků tak dochází spíše k zhutnění půdního materiálu (Grab, 2005a).

Schematické vyjádření teorií o vzniku thufurů nalezneme níže (obr. 4).



Obrázek 4: Schématické zobrazení všech čtyř teorií o vzniku thufurů (Grab, 2005a, upraveno, počestěno). Poznámka: A) Kryoexpulze klastů, B) Hydrostatický a kryostatický tlak, C) Model buněčné cirkulace, D) Diferenciální mrazový zdvih.

Různé enviromentální faktory, jako sediment náchylný k promrzání, čas, po který je půda zmrzlá, či adekvátní vlhkost hrají důležitou roli při vzniku thufurů. V semiaridních oblastech jsou thufury vázány na mokřady. Výšková hranice je různorodá, záleží na faktorech jako je sněhová pokrývka a vegetační pokryv (Grab, 2005a).

3.3. Geografické rozšíření

Půdní kopečky byly popsány jak v oblastech s výskytem permafrostu, tak i v místech, kde permafrost chybí. Obecně lze konstatovat, že jejich výskyt je nejčastější v arktických a subarktických oblastech Severní Ameriky a Evropy, kde jsou splněny klíčové klimatické i půdní podmínky pro jejich vznik (Schunke a Zoltai, 1988). Thufury se vyskytují také v alpinském prostředí obou polokoulí, ačkoli jejich rozšíření ve vyšších nadmořských výškách je méně časté než v nízko položených arktických a subarktických lokalitách. Vysokohorské prostředí poskytuje obdobné teplotní a vlhkostní podmínky jako arktické oblasti, avšak tyto lokality bývají více rozptýlené a ekologicky rozmanité. Přestože se často spojují s konkrétními

klimatickými pásmy, výskyt thufurů není striktně vázán na zeměpisnou šířku. Pokud se v daném místě vyskytne vhodná kombinace klimatických, půdních a topografických podmínek, tedy zejména přítomnost jemnozrnné, vlhké půdy, opakované cykly zamrznání a tání a vegetační pokryv, mohou thufury vzniknout i v mimoarctických oblastech. Na základě zjištěných lokalit výskytu byla vytvořena mapa rozšíření thufurů (obr. 5).

4. Metodika

4.1. Metody sběru dat

Data použitá k vytvoření této práce byla sesbírána metodou rešerše odborných článků. Na základě této rešerše vznikla tabulka (příloha 1), která byla dále statisticky zpracována. Data byla rozdělena do kategorií vhodných k dalšímu zpracování. Z rešerše vzešlo 46 lokalit s popsáním výskytu thufurů. Ne všechny studie obsahovaly veškeré potřebné údaje k dalšímu zpracování, a proto byla část dat odvozena z jiných dostupných zdrojů. K doplnění polohových údajů bylo využito analýz reliéfu (terénu) služby Google Earth Pro v lokalitách se známými souřadnicemi, takto odvozená data jsou v tabulce (příloha 1) označena modrou barvou. Jedná se o údaje z kategorií nadmořská výška, pozice vůči hranici lesa, sklon svahu a orientace svahu (tab.1). Klimatická data byla aproximována z webu Meteoblue.com, kde jsou nahraná data z velkého množství meteorologických stanic a jsou zde k dispozici i historická data, ta byla využita pro výpočty průměrů ročních teplot vzduchu, stejně jako průměrných zimních i letních teplot vzduchu, počtu týdnů s teplotami pod bodem mrazu a průměrným ročním úhrnem srážek (tab. 1). Takto odvozená data jsou v tabulce (příloha 1) označena zelenou barvou. Morfometrické parametry byly zjišťovány přímo z literatury, jedná se o údaje o délce horizontálních os a výšce thufurů. Dále byly zjišťovány, pokud to bylo z literatury možné, data o minimech, maximech a rozpětí těchto rozměrů (tab. 1). Spočítány byly poměry delší a kratší osy, pokud je autoři uváděli odděleně. Červenou barvou jsou označeny lokality, pro které nebylo možné potřebná data odvodit s dostatečnou přesností.

Tabulka 1: Seznam zkoumaných parametrů a jejich definice.

Zkoumaný parametr	Definice
číslo lokality	Číselná značka zkoumané lokality.
stát	Stát, na jehož území se zkoumaná lokalita nachází.
lokalita	Konkrétní název zkoumané lokality.
zeměpisná šířka	Zeměpisná šířka zkoumané lokality.
zeměpisná délka	Zeměpisná délka zkoumané lokality.
nadmořská výška (m n.m.)	Nadmořská výška zkoumané lokality.
pozice vůči hranici lesa	Pozice vůči teoretické horní hranici lesa zkoumané lokality.
sklon svahu (°)	Sklon svahu, na kterém se nachází zkoumaná lokalita.
orientace svahu	Orientace svahu, na kterém se nachází zkoumaná lokalita.
MAAT ¹ (°C)	Průměrná roční teplota vzduchu.
meteostanice	Meteostanice, ze které jsou odvozené klimatické charakteristiky.
MAWT ² (°C)	Průměrná teplota vzduchu v zimní části roku.
MAST ³ (°C)	Průměrná teplota vzduchu v letní části roku.
teploty pod nulou (týdny)	Počet týdnů v roce, kdy v dané lokalitě mrzne.
teploty nad nulou (týdny)	Počet týdnů v roce, kdy v dané lokalitě nemrzne.
průměrné roční srážky (mm)	Průměrný roční úhrn srážek.
srážky ve formě sněhu (mm)	Průměrný roční úhrn srážek ve formě sněhu.
zimní srážky (%)	Procento srážek spadnutých v zimní části roku.
převažující směr větru	Převažující směr větru ve zkoumané lokalitě.
hlavní osa (cm)	Průměrná délka hlavní osy thufurů ve zkoumané lokalitě.
vedlejší osa (cm)	Průměrná délka vedlejší osy thufurů ve zkoumané lokalitě.
výška (cm)	Průměrná výška thufurů ve zkoumané lokalitě.
min. délka os (cm)	Minimální délka krátké osy thufuru.
max. délka os (cm)	Maximální délka dlouhé osy thufuru.
rozpětí délek os (cm)	Rozpětí, ve kterém se délky zkoumaných os thufuru pohybují.
min. výška (cm)	Minimální výška thufuru.
max. výška (cm)	Maximální výška thufuru.
rozpětí výšek (cm)	Rozpětí, ve kterém se výšky zkoumaných os thufuru pohybují.
protažení	Poměr kratší a delší osy thufuru.
orientace thufurů	Orientace, ve které jsou thufury protažené.
zdroj	Literatura popisující lokalitu.

V případě chybějících údajů v jedné z kategorií nebyla tato lokalita při výpočtech brána v potaz. Pro chybějící polohové údaje byly z výpočtů vyjmuty lokality č. 45 a 46, tedy thufury popsané v lokalitě Daqingshan mountains a v pohoří Ruwenzori (Příloha 1). Pro chybějící morfometrické údaje nebyly brány v potaz, při výpočtech tyto údaje užívajících, lokality č. 41, 42, 43, 44, 45 a 46, tedy thufury popsané ve Wyomingu, norském Rondane, ostrově Seymour, Simen mountains, Daqingshan mountains a v pohoří Ruwenzori (Příloha 1).

¹ Mean Average Annual Temperature (průměrná roční teplota vzduchu)

² Mean Average Winter Temperature (průměrná zimní teplota vzduchu)

³ Mean Average Summer Temperature (průměrná letní teplota vzduchu)

4.2. Výpočet základních statistických charakteristik

K vyhodnocení základních polohových statistik bylo využito aritmetického průměru, který je patrně nepoužívanější statistickou charakteristikou. K jejímu výpočtu byl využit následující vzorec:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Dále byl vypočítán medián dané proměnné, ten slouží k nalezení takového prvku řady, který ji rozděluje na dvě části, polovina prvků má menší hodnotu a polovina hodnotu vyšší než vypočítaný medián. Jedná se tedy o prvek souboru, který je uprostřed dané řady. Stejně jako medián, tedy 2. kvartil souboru, byly vypočteny 1. a 3. kvartil, ukazující hodnotu přesně v jedné a třech čtvrtinách řady.

Pro výpočet procentuálního zastoupení thufurů orientovaných vůči chladnému kvadrantu dané polokoule se uvažovala orientace získaná z literatury, pro severní polokouli se za chladný považoval severní kvadrant, pro jižní polokouli kvadrant jižní. K výpočtu procentuálního zastoupení orientace thufurů vůči převažujícímu směru větru byly primárně využity informace o převažujícím větru uvedené v literatuře. Pokud v literatuře nebyl převažující směr větru uveden, přistoupilo se k předpokladu globální cirkulace atmosféry (Nanda, 2018), kde byla brána v potaz zeměpisná šířka lokality s výskytem thufurů a na jejím základě byl určen převládající směr větru v dané lokalitě, zde ovšem nelze spolehlivě říci, zda mikrorelief dané lokality nemá na převažující směr větru větší vliv než převažující atmosférické proudění.

K výpočtu základních statistických charakteristik a jejich vizualizaci bylo využito softwaru Microsoft® Excel® pro Microsoft 365 MSO (verze 2504).

4.3. Výpočet charakteristik variability

Jako charakteristiky variability byly zvoleny charakteristiky rozptylu a směrodatné odchylky, dále byla uvedena minima a maxima jednotlivých proměnných. Pro výpočet rozptylu, který udává míru rozptýlenosti dat kolem střední hodnoty, byl použit následující vzorec (Kladivo, 2013):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Směrodatná odchylka je definována jako druhá odmocnina z rozptylu (Kladivo, 2013) a jedná se o míru rozptylu sledované proměnné, matematicky ji lze vyjádřit takto:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

4.4. Výpočet míry vazeb mezi charakteristikami

Korelace byla zjišťována Pearsonovými korelačními koeficienty, míra korelace byla testována t-testem (Studentovým testem) na hladině významnosti 0,05. Pro jejich výpočet se využívá následujícího vztahu:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

který je založen na kovarianci, což je obdoba rozptylu (Kladivo, 2013).

Pro zhodnocení statisticky významných rozdílů mezi skupinami lokalit bylo využito metod analýzy rozptylu (jednocestná ANOVA), která nám umožňuje testovat hypotézy o rozdílnosti průměrných hodnot mezi dvěma a více skupinami (Tvrdík, 2008).

Pro každou proměnnou byla pomocí ANOVA vyhodnocena hypotéza, zda existuje statisticky významný rozdíl mezi průměrnými hodnotami v jednotlivých skupinách. V případě, že byl výsledný F-test významný ($p < 0,05$), bylo možné konstatovat, že alespoň jedna ze skupin se v dané proměnné od ostatních významně liší.

Výsledky analýzy rozptylu byly dále doplněny o grafické výstupy a interpretovány v kontextu ekologických a geomorfologických souvislostí. V případě, že nebylo možné aplikovat jednocestnou ANOVu pro zjištění signifikantního rozdílu, byly provedeny post-hoc testy (Least Significant Difference test- LSD test), které rozdíly ukázaly.

V této práci jsou probírány pouze ty vztahy, které byly signifikantní pro jednotlivé statistické analýzy.

4.5. Klasifikace objektů

K rozdělení souboru do skupin na základě vnitřní struktury datového souboru a tím k rozdělení do přirozeně vzniklých skupin lokalit s výskytem thufurů na základě jejich komplexní podobnosti bylo využito shlukové analýzy. Hierarchické metody shlukové analýzy vytvářejí shluky s různou hierarchickou úrovní. Princip spočívá v tom, že se shluky vytváří postupně, od nejbližších, ve vzdálenějších krocích pak stále vzdálenějších (Budíková, 2009). Vzdálenost mezi shluky byla určena Wardovou shlukovací metodou, která vybírá takové shluky ke sloučení, kde je minimální součet čtverců odchylek všech pozorování od příslušných shlukovacích průměrů (Budíková, 2009). Tato metoda má tu nevýhodu, že tvoří poměrně malé shluky, proto je potřeba vyjádřit vzdálenosti objektů euklidovskou vzdáleností. Shluky byly vyjádřeny za pomoci dendrogramů, kde každý uzel představuje shluk. Dendrogramy byly na určité euklidovské vzdálenosti vyjádřeny zároveň přehlednějšími tabulkami.

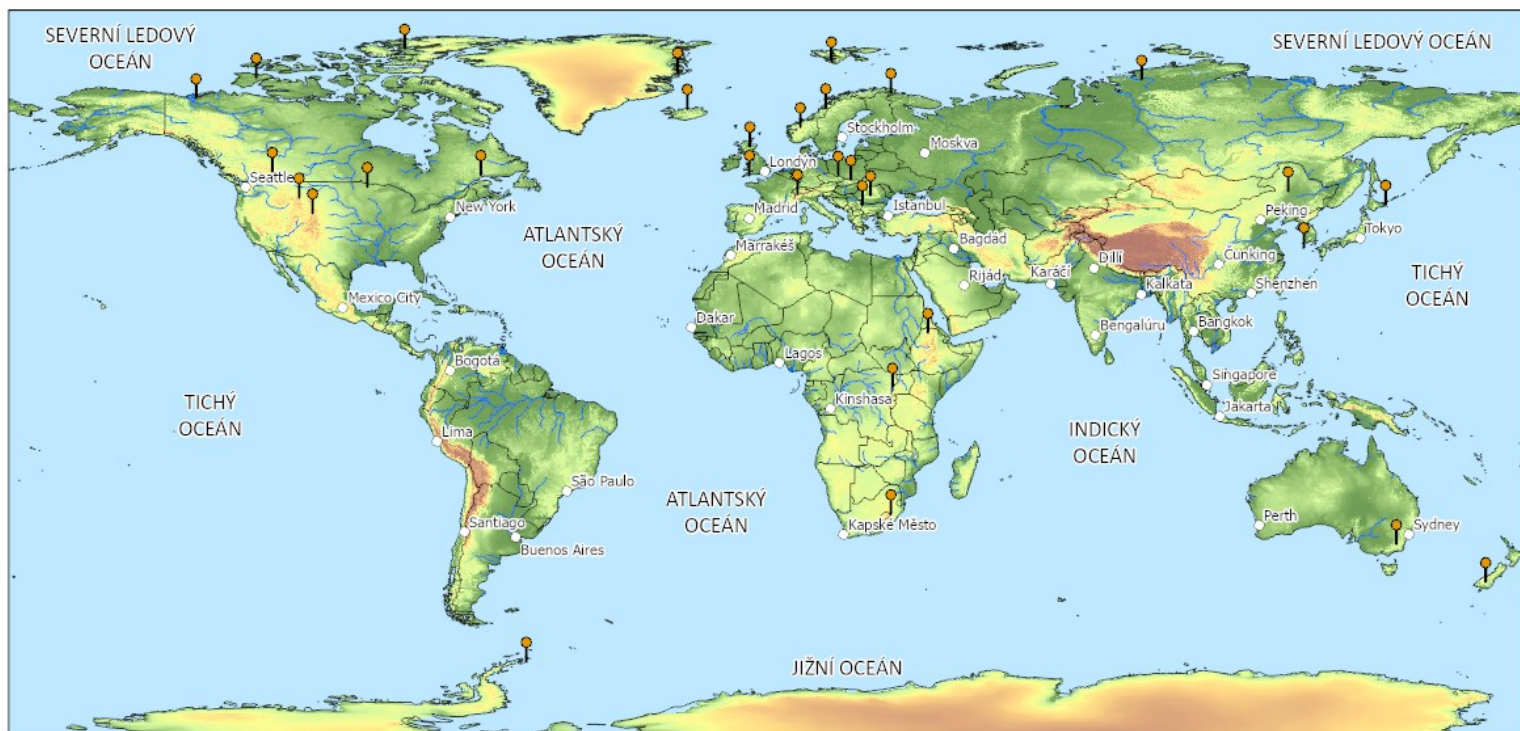
Pro citlivost shlukové analýzy na vzájemně korelované veličiny byly pro výpočty jednotlivých shluků voleny charakteristiky, které spolu vzájemně korelovaly co možná nejméně. Tyto vazby byly zjištěny z vypočítané korelační matice. Pro výpočet shluků na základě morfometrických charakteristik bylo vybráno 35 lokalit a byly uvažovány údaje o délce obou os, výšce a protažení thufuru. K tomuto výběru se přistoupilo z důvodu obecného nedostatku jiných morfometrických ukazatelů. Takto vzniklé shluky jsou dále nazývány „morfometrické shluky“. Pro klimatické charakteristiky se přistoupilo ke 46 lokalitám a uvažovány byly proměnné MAAT, MAWT, MAST, teploty pod nulou a srážky. Důvodem pro tento výběr byla nejnižší možná míra vzájemné korelace. Takto vzniklé shluky jsou dále nazývány „klimatické shluky“. Vzhledem k tomu, že při těchto výběrech nebylo možné uvažovat pouze charakteristiky, které spolu vzájemně nekorelují, byla provedena i shluková analýza báze 36 lokalit, která uvažovala délku vedlejší osy, zeměpisnou šířku dané lokality, průměrný roční úhrn srážek, sklon svahu a protažení thufuru. Výběrem těchto charakteristik bylo dosaženo shluků, které celý soubor dat reprezentují nejpřesněji. K tomuto výběru bylo přistoupeno na základě vypočtené korelační matice (Příloha 2). Takto vzniklé shluky jsou dále nazývány „shluky na bázi“.

Míry vazeb byly zjištěny a klasifikace objektů byla provedena v softwaru STATISTICA 9.0. (StatSoft, 2025).

5. Výsledky

5.1. Polohové a klimatické charakteristiky lokalit s thufury

Dle dostupných dat se z celkového souboru 46 lokalit 82,6 % zdokumentovaných thufurů nachází na severní polokouli. Zbytek, tedy 17,4 % na polokouli jižní. 61,4 % lokalit se nachází v oblastech nad horní hranicí lesa. 38,6 % se sice nachází pod teoretickou horní hranicí lesa, ovšem v místech převážně nezalesněných. Na základě zjištěných lokalit výskytu byla vytvořena mapa rozšíření thufurů (obr. 5).



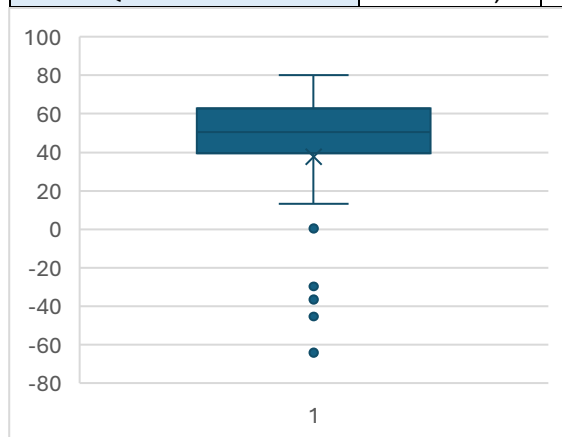
Obrázek 5: Mapa rozšíření thufurů, oranžové body značí lokality výskytu (tab. 16), upraveno.

5.1.1. Polohové charakteristiky lokalit s výskytem thufurů

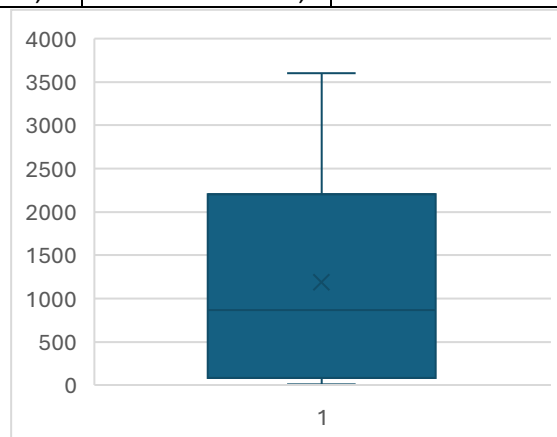
Nejčastěji se thufury popsané v literatuře nacházejí ve středních zeměpisných šířkách mezi 40° - 60° s. z. š. (obr. 6). Medián nadmořské výšky je 870 m n. m. (tab. 2), vzhledem k vychýlení dat směrem k vysokým nadmořským výškám (šikmost: 0,615) je uveden krabicový diagram rozložení nadmořských výšek, z něhož lze vyčíst kvartily, v nichž se popsané thufury nejčastěji nacházejí (obr. 7). Vysoká hodnota směrodatné odchylky (tab. 2) říká, že jde o hodnotu velmi variabilní, nejnižše položené zdokumentované půdní kopečky se nacházejí ve výšce pouze 9 m n. m., zatímco ty nejvýše položené ve výšce 3600 m n. m. Lze tedy říci, že se thufury nachází jak v nížinách, tak ve vysokohorských oblastech. Hodnota průměrného sklonu svahu $3,18^{\circ}$ při směrodatné odchylce $2,2^{\circ}$ (tab. 2) svědčí o převládajícím výskytu lokalit na rovinách, či na mírně sklonitých svazích. Relativně nízká odchylka současně poukazuje na homogenní charakter rozložení sklonů napříč celým souborem.

Tabulka 2: Polohové charakteristiky lokalit s thufurů.

	zeměpisná šířka (°)	zeměpisná délka (°)	nadmořská výška (m n.m.)	sklon svahu (°)
aritmetický průměr	37,82	-11,73	1190,2	3
medián	50,41	2,00	870,0	3
minimum	-64,03	-133,68	9,0	0
maximum	80,00	169,25	3600,0	8
směrodatná odchylka	37,38	77,92	1180,1	2
rozptyl	1397,54	6071,47	1392532,5	5
kvartil Q1	41,82	-62,74	93,8	2
kvartil Q3	61,79	29,34	2173,8	5



Obrázek 6: Krabicový diagram rozložení zeměpisných šířek.



Obrázek 7: Krabicový diagram rozložení nadmořských výšek.

Z údajů o orientaci svahů (tab. 3), lze usuzovat, že není jedna převažující orientace. Svahy s výskytem thufurů jsou vcelku rovnoměrně rozloženy mezi jižní, severní a západní orientaci. Pro tyto výpočty nebyly uvažovány orientace pro roviny, tedy plochy o sklonu do 2°. 17,4 % je popsáno na svazích příklánějících se převažujícímu směru větru v daných lokalitách a pouze 6,8 % je orientováno přímo vůči chladnému kvadrantu dané polokoule.

Tabulka 3: Procentuální zastoupení orientací svahů s výskytem thufurů.

pozice vůči chladnému kvadrantu (%)	6,8
pozice vůči převažujícímu větru (%)	17,4
jižní orientace (%)	18
severní orientace (%)	18
západní orientace (%)	20
východní orientace (%)	9
jihozápadní orientace (%)	9
severovýchodní orientace (%)	5
jihovýchodní orientace (%)	5
severozápadní orientace (%)	5
rovina (%)	11

5.1.2. Klimatické charakteristiky lokalit s výskytem thufurů

Klimatické charakteristiky (tab. 4) ukazují, že průměrné klima v místech s výskytem thufurů je chladné, s průměrnými ročními teplotami vzduchu 2,43 °C, ovšem medián těchto teplot 4 °C ukazuje na výskyt chladnějších lokalit, které průměr snižují. Směrodatná odchylka 8,14 °C naznačuje určitou míru variability teplotních údajů. Zimní průměrné teploty vzduchu jsou, jak se dalo očekávat, nižší, avšak vyjádřené směrodatnou odchylkou 10,28 °C vykazují vyšší variabilitu než celoroční průměry. Naopak letní teploty vzduchu vykazují z hlediska rozptýlení nejnižší variabilitu, směrodatná odchylka nabývá hodnoty 6,46 °C.

V oblastech s výskytem půdních kopečků mrzne v průměru necelých 22 týdnů ročně (tab. 4), tedy zhruba 5,5 měsíce. Tento údaj je však výrazně ovlivněn chladnějšími lokalitami, což dokládá i hodnota mediánu 17 týdnů (cca 4 měsíce). Směrodatná odchylka 12,6 týdne potvrzuje vysokou variabilitu v délce mrazového období.

Průměrné roční srážky se pohybují v rozmezí od 76 mm do 7647 mm (tab. 4), což ukazuje, že thufury se mohou vyskytovat jak v extrémně suchých, tak i ve velmi vlhkých oblastech. Směrodatná odchylka ve výši 1264,03 mm poukazuje na výraznou variabilitu těchto hodnot napříč celým souborem lokalit s thufury. Většina popsaných lokalit neobsahuje údaje o formě, ve které srážky spadly. Z celkového souboru dat jen 35 % lokalit nese informace o charakteru a rozdělení srážek v průběhu roku (Příloha 1).

Tabulka 4: Klimatické charakteristiky lokalit s výskytem thufurů.

	MAAT (°C)	MAWT (°C)	MAST (°C)	Teploty pod nulou (týdny)	průměrné roční srážky (mm)
aritmetický průměr	2,43	-3,44	9,09	21,93	1176,63
medián	4,00	0,00	10,00	17,00	976,00
minimum	-20,00	-27,00	-9,50	0,00	76,00
maximum	19,50	19,50	21,00	48,00	7647,00
směrodatná odchylka	8,14	10,28	6,46	12,60	1264,03
rozptyl	66,25	105,69	41,69	158,76	1597782,54

5.2. Morfometrické charakteristiky thufurů

Morfometrické charakteristiky thufurů (tab. 5) ukazují, že průměrná délka hlavní (delší) osy činí 100 cm, zatímco vedlejší (kratší) osy 96 cm. Průměrná výška thufurů dosahuje 42 cm. Hodnoty směrodatných odchylek nicméně opět poukazují na vysokou variabilitu sledovaných rozměrů.

Rozpětí průměrné délky hlavní osy se pohybuje mezi 30 cm a 210 cm, zatímco výška kolísá od 15 cm do 125 cm. Nejmenší zaznamenané thufury měly průměr pouhých 9 cm a výšku 3 cm, zatímco největší dosahovaly průměru až 249 cm a výšky 175 cm.

Poměr délek hlavní a vedlejší osy (x/y) dosahuje hodnoty 0,95, což naznačuje pouze mírné odchýlení od ideálního kruhového tvaru. Tato hodnota je však pravděpodobně ovlivněna omezeným množstvím studií, které odděleně zaznamenávají délky obou os. Nejvyšší míru protažení 0,737 vykazují thufury na Pradědu (Tremel et. al, 2010) Thufury v údolí Zackenbergru v Grónsku (Ruiz-Fernández, 2020) vykazují hodnotu poměru hlavní a vedlejší osy 0,753. Naopak kruhové thufury byly popsány Grabem (1998) v Lesotských horách.

Tabulka 5: Morfometrické charakteristiky lokalit s výskytem thufurů.

	hlavní osa (cm)	vedlejší osa (cm)	výška (cm)	min. rozměr hlavní osy (cm)	max. rozměr hlavní osy (cm)	min. výška (cm)	max. výška (cm)	poměr obou os
aritmetický průměr	100	96	42	67	148	31	62	0,95
medián	98	95	35	78	128	20	49	1,00
minimum	30	30	15	9	50	3	20	0,60
maximum	210	210	125	125	249	75	175	1,00
směrodatná odchylka	52	52	27	37	59	25	40	0,10
rozptyl	2659	2735	702	1343	3535	618	1568	0,01

5.3. Vazby mezi polohovými, klimatickými a morfometrickými charakteristikami thufurů

K účelu zjištění vazeb mezi různými charakteristikami zjištěnými na popsáných lokalitách s výskytem thufurů byla zpracována korelační matice (příloha 2), která uvádí veškeré korelace mezi sledovanými parametry a zvýrazňuje vztahy statisticky významné testované t-testem na hladině spolehlivosti 0,95.

V geografickém kontextu byl zjištěn očekávaný negativní vztah mezi zeměpisnou šířkou lokality a nadmořskou výškou (tab. 6), v níž se nachází, což naznačuje, že thufury se ve směru k rovníku vyskytují ve vyšších nadmořských výškách ($r = -0,70$). Podobně se ukázalo, že se zvyšující se průměrnou zimní teplotou vzduchu klesá zeměpisná šířka lokalit ($r = -0,46$), zatímco vyšší počet týdnů s teplotami pod bodem mrazu je spojen s vyšší zeměpisnou šířkou ($r = 0,49$).

S rostoucí nadmořskou výškou lokality klesá výška thufurů ($r = -0,54$) a současně se zmenšují jejich minimální rozměry hlavní osy ($r = -0,51$) (tab. 5). Sklon svahu s výskytem kopečků pak vykazuje negativní korelaci s výškou thufurů ($r = -0,48$), což může naznačovat, že prudší svahy omezují jejich vertikální růst.

Z klimatického hlediska se potvrdilo, že vyšší průměrná roční teplota vzduchu silně pozitivně koreluje s vyšší zimní teplotou vzduchu ($r = 0,87$) a naopak negativně koreluje s počtem týdnů s mrazivými teplotami ($r = -0,70$) (tab. 6). Tato teplejší prostředí zároveň koreluje s nárůstem rozměrů thufurů ve všech třech morfometrických dimenzích (hlavní osa, $r = 0,45$;

vedlejší osa, $r = 0,45$; výška, $r = 0,52$). Zimní teplota vzduchu navíc pozitivně koreluje s průměrným ročním úhrnem srážek ($r = 0,56$).

Delší mrazové období je spojeno se zmenšením horizontálních rozměrů thufurů (tab. 5), a to jak hlavní ($r = -0,51$), tak vedlejší osy ($r = -0,50$). Vyšší roční úhrn srážek je naopak spojen s většími maximálními rozměry hlavní osy ($r = 0,61$). Silná pozitivní korelace mezi jednotlivými rozměry thufurů (hlavní a vedlejší osa: $r = 1,00$; hlavní osa a výška: $r = 0,66$) potvrzuje, že větší thufury bývají konzistentně rozměrnější ve všech směrech.

Tabulka 6: Významné korelační vztahy v rámci datového souboru.

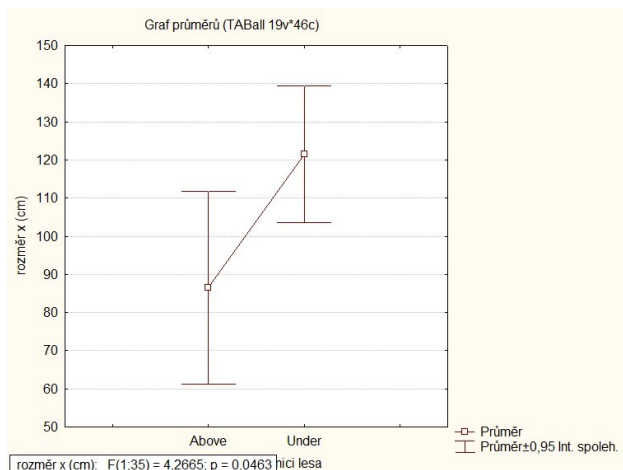
Vztah	Korelační koeficient (r)
Zeměpisná šířka ↔ Nadmořská výška	-0,7
Průměrná zimní teplota vzduchu ↔ Zeměpisná šířka	-0,46
Týdny mrazu ↔ Zeměpisná šířka	0,49
Nadm. výška ↔ Výška thufuru	-0,54
Nadm. výška ↔ Min. rozměr hlavní osy	-0,51
Sklon svahu ↔ Výška thufuru	-0,48
Průměrná roční teplota vzduchu ↔ Zimní teplota	0,87
Průměrná roční teplota vzduchu ↔ Týdny mrazu	-0,7
Průměrná roční teplota vzduchu ↔ Hlavní osa thufuru	0,45
Průměrná roční teplota vzduchu ↔ Vedlejší osa thufuru	0,45
Průměrná roční teplota vzduchu ↔ Výška thufuru	0,52
Průměrná zimní teplota vzduchu ↔ Roční srážky	0,56
Týdny mrazu ↔ Hlavní osa thufuru	-0,51
Týdny mrazu ↔ Vedlejší osa thufuru	-0,5
Roční srážky ↔ Max. rozměr hlavní osy	0,61
Hlavní osa thufuru ↔ Vedlejší osa thufuru	1
Hlavní osa thufuru ↔ Výška thufuru	0,66

5.4. Analýza rozptylu a testování rozdílů mezi skupinami

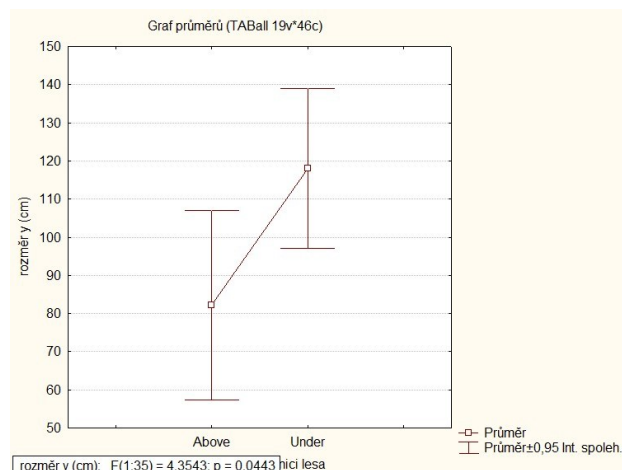
5.4.1. Morfometrické charakteristiky v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa

Při pohledu na morfometrické charakteristiky lokalit s výskytem thufurů (obr. 8, 9 a 10) lze konstatovat, že thufury nacházející se pod horní hranicí lesa dosahují obecně větších rozměrů než ty, které se nacházejí nad touto hranicí. Tento rozdíl je patrný ve všech sledovaných dimenzích (hlavní a vedlejší osa, výška), včetně minimálního průměru i minimální výšky.

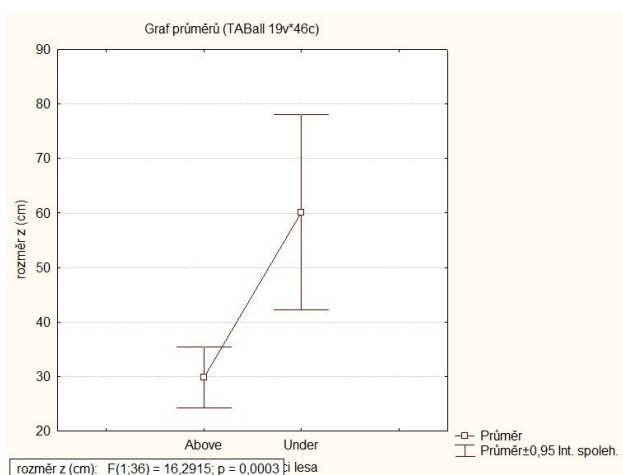
Thufury pod horní hranicí lesa mají v průměru horizontální rozměry přibližně 121×118 cm a dosahují průměrné výšky kolem 60 cm. Naproti tomu thufury nad hranicí lesa vykazují menší základnu o průměrných horizontálních rozměrech zhruba 87×82 cm a dosahují průměrné výšky přibližně 30 cm.



Obrázek 8: Graf průměrů pro hlavní osu thufuru.



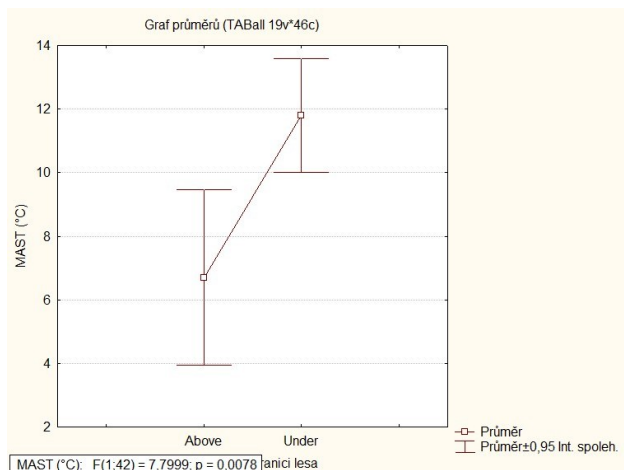
Obrázek 9: Graf průměrů pro vedlejší osu thufuru v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa.



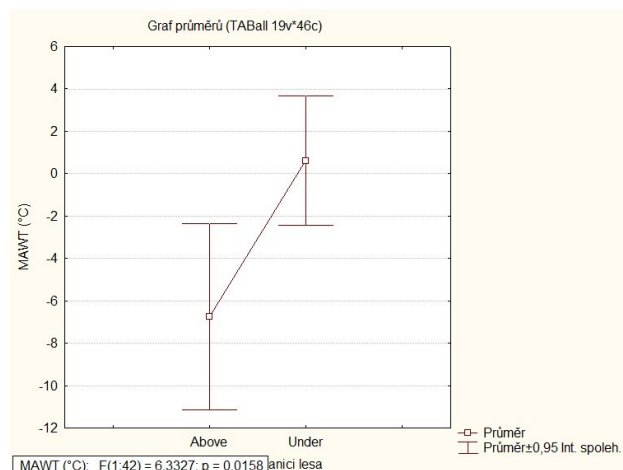
Obrázek 10: Graf průměrů pro výšku thufuru v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa.

5.4.2. Klimatické charakteristiky v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa

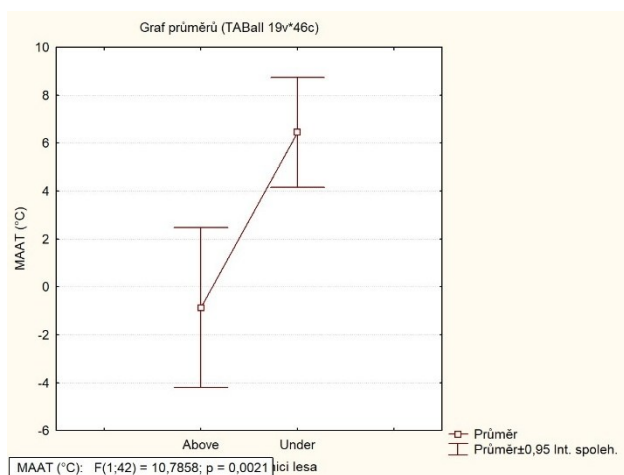
Na základě klimatických charakteristik (obr. 11, 12 a 13) lze konstatovat, že teploty vzduchu pod horní hranicí lesa jsou, v souladu s očekáváním, obecně vyšší než teploty vzduchu nad touto hranicí. Průměrná roční teplota vzduchu v nižších lokalitách pod hranicí lesa dosahuje přibližně 6 °C, zatímco ve vyšších polohách nad hranicí lesa klesá až k -1 °C. Zimní průměrné teploty vzduchu se pod hranicí lesa pohybují kolem 0,5 °C, zatímco nad touto hranicí dosahují přibližně -6,5 °C. Letní průměrné teploty vzduchu dosahují ve zkoumaných lokalitách hodnoty kolem 12 °C pod hranicí lesa a přibližně 7 °C nad ní.



Obrázek 11: Graf průměrů pro letní průměrné teploty vzduchu.



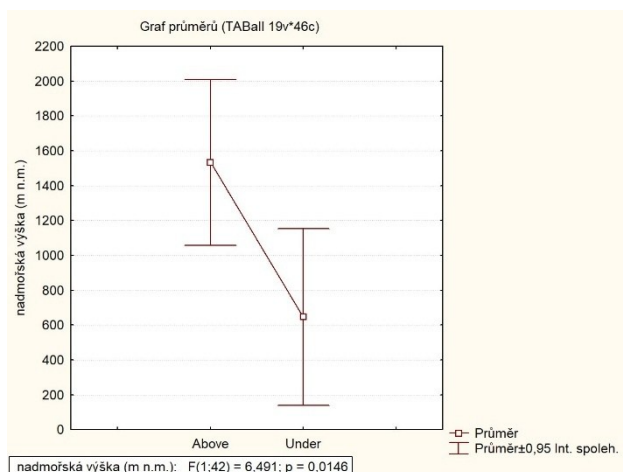
Obrázek 12: Graf průměrů pro zimní průměrné teploty vzduchu v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa.



Obrázek 13: Graf průměrů pro průměrné roční teploty vzduchu v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa.

5.4.3. Polohové charakteristiky v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa

Zde je zmíněn vztah, který je sice očekávaný, nicméně tím posiluje důvěryhodnost výše uvedených zjištění. Lokality nacházející se nad horní hranicí lesa mají v průměru vyšší nadmožskou výšku než lokality pod touto hranicí (obr. 14). Konkrétně se průměrná nadmožská výška lokalit nad hranicí lesa pohybuje okolo 1550 m n. m., zatímco lokality pod hranicí lesa dosahují v průměru přibližně 650 m n. m.



Obrázek 14: Graf průměrů pro nadmořskou výšku lokality s výskytem thufurů v závislosti na pozici vůči horní hranici lesa.

5.4.4. Polohové charakteristiky v závislosti na orientaci svahu

Rozdíly mezi nadmořskými výškami thufurových lokalit na svazích orientovaných k severu a svahy s jinou orientací jsou statisticky významné (tab. 7). Severně orientované svahy se v průměru nacházejí ve vyšších nadmořských výškách než svahy ukloněné k ostatním světovým stranám.

Tabulka 7: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a nadmořské výšky. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.

LSD test: proměnná nadmořská výška (m n.m.), Pravděpodobnosti pro post-hoc testy, $P\check{C} = 1214E3$, $sv = 35,000$										
	průměr	844	2241	683	961	1540	2475	761	234	525
	orientace svahu	Z	S	V	J	JZ	SV	rovina	JV	SZ
1	Z		0,013	0,809	0,827	0,300	0,066	0,894	0,484	0,714
2	S	0,013		0,027	0,026	0,306	0,789	0,024	0,027	0,057
3	V	0,809	0,027		0,682	0,279	0,069	0,916	0,641	0,870
4	J	0,827	0,026	0,682		0,397	0,091	0,752	0,409	0,620
5	JZ	0,300	0,306	0,279	0,397		0,334	0,299	0,180	0,295
6	SV	0,066	0,789	0,069	0,091	0,334		0,071	0,050	0,085
7	rovina	0,894	0,024	0,916	0,752	0,299	0,071		0,571	0,799
8	JV	0,484	0,027	0,641	0,409	0,180	0,050	0,571		0,793
9	SZ	0,714	0,057	0,870	0,620	0,295	0,085	0,799	0,793	

Svahy s thufury orientované k jihu mají obecně větší sklon než svahy směřující k západu nebo severu (tab. 8). Podobně i severozápadně orientované svahy bývají strmější než svahy západní a severní orientace. Rozdíl ve sklonu mezi svažitým terénem a rovinami je statisticky významný u většiny světových stran, ke kterým mohou být svahy orientovány.

Tabulka 8: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a sklonu svahu. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.

LSD test: proměnná sklon svahu (°), Pravděpodobnosti pro post-hoc testy, PČ = 3,1813, sv = 35,000										
	průměr	3	3	4	5	4	4	0	3	7
	orientace svahu	Z	S	V	J	JZ	SV	rovina	JV	SZ
1	Z		0,937	0,123	0,031	0,186	0,307	0,015	0,752	0,008
2	S	0,937		0,146	0,043	0,216	0,336	0,014	0,792	0,009
3	V	0,123	0,146		0,820	0,844	0,872	0,001	0,424	0,154
4	J	0,031	0,043	0,820		0,650	0,725	0,000	0,295	0,165
5	JZ	0,186	0,216	0,844	0,650		1,000	0,002	0,522	0,115
6	SV	0,307	0,336	0,872	0,725	1,000		0,011	0,579	0,170
7	rovina	0,015	0,014	0,001	0,000	0,002	0,011		0,052	0,000
8	JV	0,752	0,792	0,424	0,295	0,522	0,579	0,052		0,058
9	SZ	0,008	0,009	0,154	0,165	0,115	0,170	0,000	0,058	

5.4.5. Klimatické charakteristiky v závislosti na orientaci svahu

Z klimatických charakteristik byly identifikovány pouze dvě statisticky významné souvislosti. Průměrné roční teploty vzduchu (tab. 9) jsou vyšší v lokalitách thufurů situovaných na rovině než v lokalitách, kde se nacházejí thufury na svazích orientovaných k jihu.

Tabulka 9: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a průměrné roční teploty vzduchu. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.

LSD test: proměnná MAAT (°C), Pravděpodobnosti pro post-hoc testy, PČ = 62,383, sv = 35,000										
	průměr	1,5	2,4	4,9	-3,1	-0,1	4,8	7,5	-2,3	8,5
	orientace svahu	Z	S	V	J	JZ	SV	rovina	JV	SZ
1	Z		0,807	0,476	0,242	0,749	0,597	0,179	0,552	0,262
2	S	0,807		0,612	0,172	0,612	0,709	0,265	0,461	0,335
3	V	0,476	0,612		0,108	0,381	0,986	0,623	0,305	0,599
4	J	0,242	0,172	0,108		0,534	0,216	0,024	0,891	0,071
5	JZ	0,749	0,612	0,381	0,534		0,485	0,162	0,752	0,218
6	SV	0,597	0,709	0,986	0,216	0,485		0,680	0,382	0,638
7	rovina	0,179	0,265	0,623	0,024	0,162	0,680		0,149	0,881
8	JV	0,552	0,461	0,305	0,891	0,752	0,382	0,149		0,182
9	SZ	0,262	0,335	0,599	0,071	0,218	0,638	0,881	0,182	

Průměrný roční úhrn srážek (tab. 10) je vyšší v lokalitách thufurů orientovaných k jihozápadu než v lokalitách orientovaných k jihu.

Tabulka 10: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a průměrného ročního úhrnu srážek. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.

LSD test: proměnná průměrné roční srážky (mm), Pravděpodobnosti pro post-hoc testy, $P\check{C} = 1474E3$, $sv = 35,000$										
	průměr	1131	1112	792	561	2332	2046	947	1087	1090
	orientace svahu	Z	S	V	J	JZ	SV	rovina	JV	SZ
1	Z		0,975	0,645	0,341	0,109	0,342	0,788	0,963	0,966
2	S	0,975		0,669	0,370	0,110	0,338	0,813	0,979	0,981
3	V	0,645	0,669		0,758	0,082	0,241	0,850	0,781	0,779
4	J	0,341	0,370	0,758		0,023	0,131	0,581	0,587	0,586
5	JZ	0,109	0,110	0,082	0,023		0,787	0,098	0,244	0,245
6	SV	0,342	0,338	0,241	0,131	0,787		0,287	0,435	0,436
7	rovina	0,788	0,813	0,850	0,581	0,098	0,287		0,891	0,889
8	JV	0,963	0,979	0,781	0,587	0,244	0,435	0,891		0,998
9	SZ	0,966	0,981	0,779	0,586	0,245	0,436	0,889	0,998	

5.4.6. Morfometrické charakteristiky v závislosti na orientaci svahu

Z výsledků analýzy morfometrie v závislosti na orientaci svahu lze vyčíst, že hlavní osa thufuru je delší, pokud je svah ukloněn k jihu, než pokud je ukloněn k severu (tab. 11).

Tabulka 11: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a hlavní osy thufuru. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.

LSD test: proměnná hlavní osa thufuru (cm), Pravděpodobnosti pro post-hoc testy, $P\check{C} = 2641,4$, $sv = 28,000$										
	průměr	108	62	75	125	98	83	123	145	113
	orientace svahu	Z	S	V	J	JZ	SV	rovina	JV	SZ
1	Z		0,078	0,349	0,539	0,802	0,544	0,629	0,361	0,922
2	S	0,078		0,711	0,032	0,390	0,609	0,064	0,051	0,357
3	V	0,349	0,711		0,184	0,635	0,866	0,234	0,147	0,527
4	J	0,539	0,032	0,184		0,525	0,331	0,958	0,629	0,837
5	JZ	0,802	0,390	0,635	0,525		0,780	0,575	0,363	0,807
6	SV	0,544	0,609	0,866	0,331	0,780		0,379	0,238	0,637
7	rovina	0,629	0,064	0,234	0,958	0,575	0,379		0,621	0,866
8	JV	0,361	0,051	0,147	0,629	0,363	0,238	0,621		0,615
9	SZ	0,922	0,357	0,527	0,837	0,807	0,637	0,866	0,615	

Při analýze vedlejší osy (tab. 12) se již objevuje více statisticky významných souvislostí.

Vedlejší (kratší) osa thufurů je menší, pokud se nacházejí na svazích orientovaných k severu,

ve srovnání se svahy orientovanými k západu, jihu, jihovýchodu nebo s oblastmi rovinatého charakteru.

Tabulka 12: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a vedlejší osy thufuru. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.

LSD test: proměnná vedlejší osa thufuru (cm), Pravděpodobnosti pro post-hoc testy, $P\check{C} = 2608,7$, $sv = 28,000$										
	průměr	107	53	69	116	98	83	120	145	113
	orientace svahu	Z	S	V	J	JZ	SV	rovina	JV	SZ
1	Z		0,038	0,266	0,745	0,807	0,547	0,677	0,354	0,917
2	S	0,038		0,662	0,031	0,284	0,469	0,041	0,031	0,280
3	V	0,266	0,662		0,199	0,541	0,761	0,197	0,113	0,459
4	J	0,745	0,031	0,199		0,658	0,433	0,902	0,495	0,955
5	JZ	0,807	0,284	0,541	0,658		0,779	0,611	0,360	0,806
6	SV	0,547	0,469	0,761	0,433	0,779		0,407	0,235	0,635
7	rovina	0,677	0,041	0,197	0,902	0,611	0,407		0,580	0,900
8	JV	0,354	0,031	0,113	0,495	0,360	0,235	0,580		0,613
9	SZ	0,917	0,280	0,459	0,955	0,806	0,635	0,900	0,613	

Na základě výsledků pro výšku thufurů (tab. 13) lze konstatovat, že thufury na severně orientovaných svazích bývají nižší než ty, které se nacházejí na západních svazích nebo na rovině. Zároveň bylo zjištěno, že thufury situované v rovinatém terénu jsou vyšší než ty, které se nacházejí na svazích orientovaných k jihu či severovýchodu.

Tabulka 13: Výsledky Fisherova LSD post-hoc testu pro vztah orientace svahu a výšky thufuru. Červeně označená čísla ukazují na signifikantní výsledky mezi pozorovanými orientacemi.

LSD test: proměnná výška thufuru (cm), Pravděpodobnosti pro post-hoc testy, $P\check{C} = 605,17$, $sv = 29,000$										
	průměr	48	22	44	43	38	27	76	20	50
	orientace svahu	Z	S	V	J	JZ	SV	rovina	JV	SZ
1	Z		0,042	0,832	0,724	0,607	0,284	0,066	0,298	0,897
2	S	0,042		0,199	0,111	0,436	0,824	0,001	0,936	0,162
3	V	0,832	0,199		0,957	0,774	0,442	0,102	0,405	0,791
4	J	0,724	0,111	0,957		0,780	0,408	0,043	0,388	0,728
5	JZ	0,607	0,436	0,774	0,780		0,658	0,083	0,566	0,615
6	SV	0,284	0,824	0,442	0,408	0,658		0,028	0,831	0,347
7	rovina	0,066	0,001	0,102	0,043	0,083	0,028		0,052	0,237
8	JV	0,298	0,936	0,405	0,388	0,566	0,831	0,052		0,328
9	SZ	0,897	0,162	0,791	0,728	0,615	0,347	0,237	0,328	

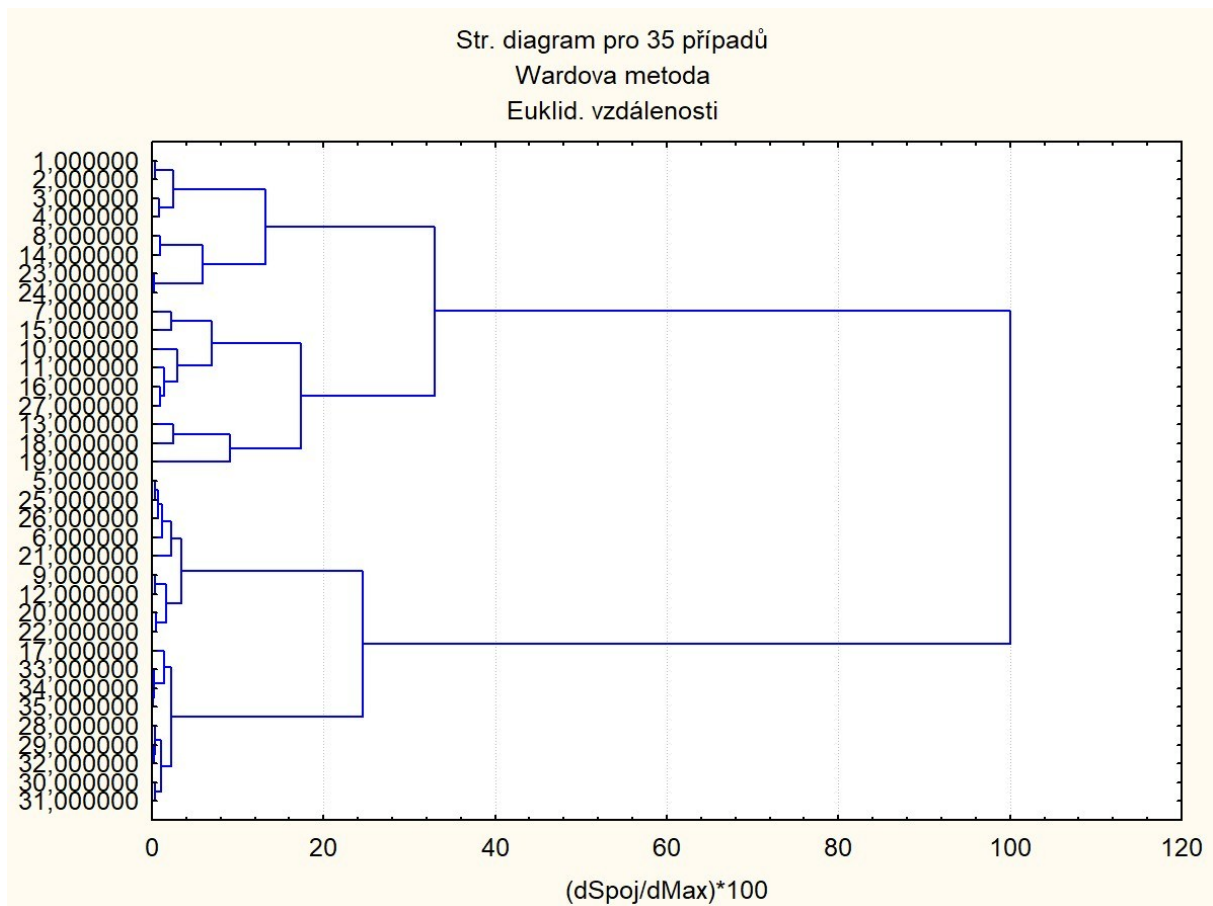
5.5. Klasifikace lokalit pomocí shlukové analýzy

5.5.1. Morfometrické shluky

Na základě morfometrické podobnosti, založené na parametrech délka obou os, výška a protažení thufuru, vznikly čtyři kategorie podobnosti (tab. 14, obr. 15).

Tabulka 14: Kategorie podobností na základě morfologických charakteristik délka obou os, výška a protažení thufuru.
Poznámka: Číslo lokality se shoduje s číslem v Příloze 1.

Číslo lokality	Stát	Lokalita	Zdroj
Morfologie bez extrémů (Eukleid. Vzdálenost 20)			
Shluk 1			
1	Lesotho	Mashai	Grab (2005, 1998)
2	Lesotho	Mohlesi	Grab (1998)
3	Lesotho	Popple peak	Grab (1998)
4	Lesotho	Mafadi	Grab (1998)
8	Jižní Afrika	Natal Drakensberg	Boelhouwers (1991)
14	Montana	Beartooth Plateau	Johnson (1962)
23	Kanada	Rocky Mountains	Scotter (1982)
24	Kanada	Rocky Mountains	Scotter (1982)
Shluk 2			
7	Nový Zéland	Old Man Range	Billings (1961)
15	Česko	Jeseníky	Tremel (2010)
10	Austrálie	Kosciusko	Costin (1973)
11	Norsko	Jotunheimen	Ellis (1983)
16	Srbsko	Ponor	Milošević (2022)
27	Slovensko	Vysoké Tatry	Raczkowka (2007)
13	Norsko	Okstindan	Gurney (2015)
18	Velká Británie	West Dartmoor	Killingbeck (2012)
19	Jižní Korea	Jeju island	Kim (2008)
Shluk 3			
5	Grónsko	Zackenberg valley	Ruiz-Fernández (2020)
25	Špicberky	Fuglebekken	Szymański (2013)
26	Island	Víkurbakki	Webb (1972)
6	Rusko	Tajmyr	Biasi (2005)
21	Finsko	Severní laponsko	Luoto (2002)
9	Kanada	Tuktoyaktuk	Brewert (1975)
12	Kanada	Banks island	French (1971)
20	Kanada	Ellesmere Island	Lewkowicz (2011)
22	Kanada	Banks island	Reynolds (2005)
Shluk 4			
17	Japonsko	Poloostrov Nemuro	Ogata (2007)
33	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Fontaine)	Dionne (1988)
34	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Baie du Milieu)	Dionne (1988)
35	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Ile Verte)	Dionne (1988)
28	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Cormier)	Dionne (1988)
29	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Riviere)	Dionne (1988)
32	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Musquaro)	Dionne (1988)
30	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Nyel)	Dionne (1988)
31	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Brule)	Dionne (1988)



Obrázek 15: Shluky lokalit thufurů dle morfologických charakteristik délka obou os, výška a protažení thufuru. Poznámka: na ose x jsou uvedeny v relativní škále eukleidovské vzdálenosti mezi příslušnými lokalitami thufurů, na ose y jsou uvedeny identifikátory (čísla) sledovaných lokalit, jejich seznam naleznete v příloze 1.

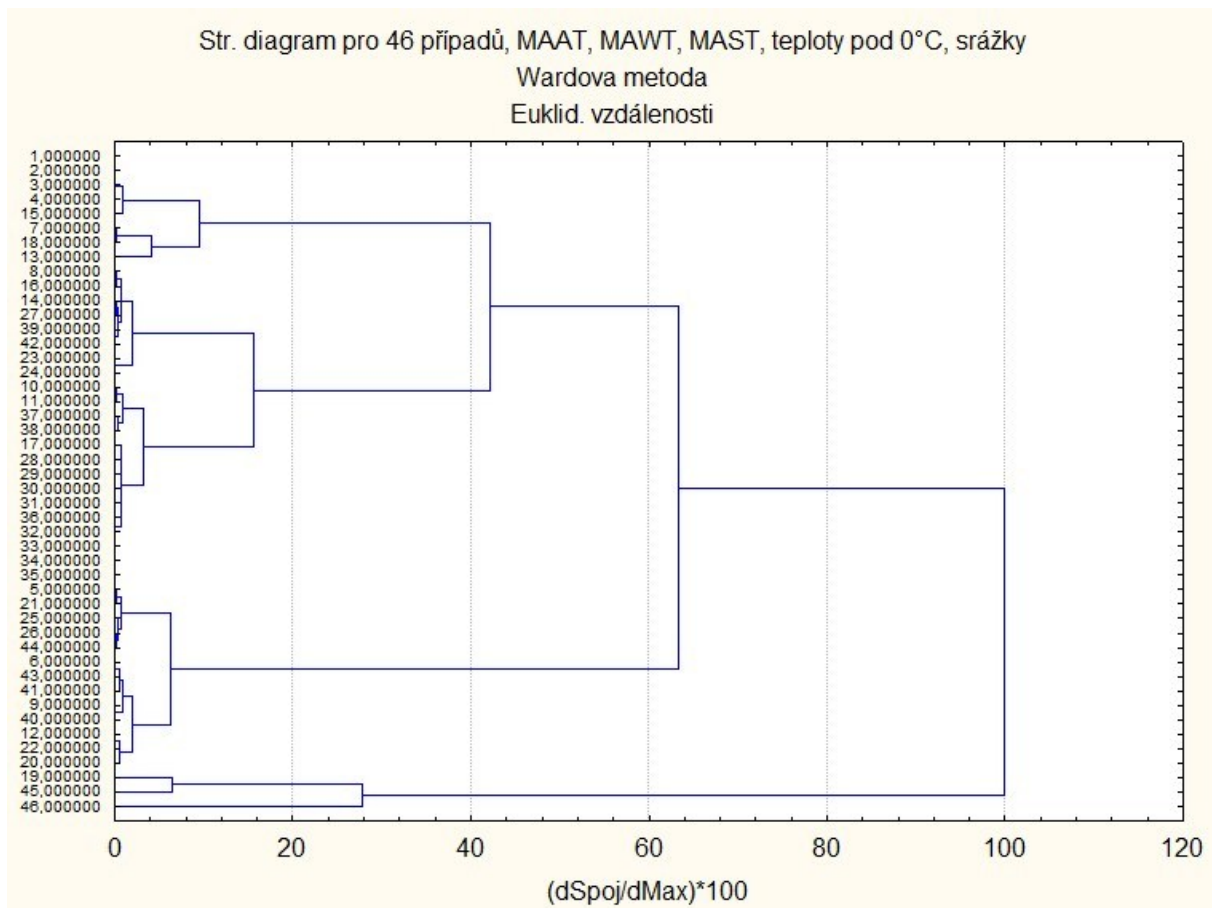
5.5.2. Klimatické shluky

Na základě klimatických charakteristik MAAT, MAWT, MAST, teploty pod nulou a srážky bylo pomocí shlukové analýzy identifikováno šest kategorií lokalit, které vykazují vnitřní podobnost v rámci skupin (tab. 15, obr. 16).

Tabulka 15: Kategorie podobnosti na základě MAAT, MAWT, MAST, teplot pod nulou a úhrnu srážek. Poznámka: Číslo lokality se shoduje s číslem v Příloze 1.

Číslo lokality	Stát	Lokalita	Zdroj
Klima (Eukleid. vzdálenost 12)			
Shluk 1			
3	Lesotho	Popple peak	Grab (1998)
4	Lesotho	Mafadi	Grab (1998)
15	Česko	Jeseníky	Tremel (2010)
7	Nový Zéland	Old Man Range	Billings (1961)
18	Velká Británie	West Dartmoor	Killingbeck (2012)
13	Norsko	Okstindan	Gurney (2015)
1	Lesotho	Mashai	Grab (2005, 1998)
2	Lesotho	Mohlesi	Grab (1998)

Číslo lokality	Stát	Lokalita	Zdroj
Shluk 2			
8	Jižní Afrika	Natal Drakensberg	Boelhouwers (1991)
16	Srbsko	Ponor	Milošević (2022)
14	Montana	Beartooth Plateau	Johnson (1962)
27	Slovensko	Vysoké Tatry	Raczkowka (2007)
39	Minnesota	Marcell experimental forest	Farrish (1985)
42	Norsko	Rondane	Barsch (1976)
23	Kanada	Rocky Mountains	Scotter (1982)
24	Kanada	Rocky Mountains	Scotter (1982)
Shluk 3			
10	Austrálie	Kosciusko	Costin (1973)
11	Norsko	Jotunheimen	Ellis (1983)
37	Rumunsko	Faragaš	Raczkowka (2007)
38	Itálie	Aosta valley	Pintaldi (2016)
17	Japonsko	Poloostrov Nemuro	Ogata (2007)
28	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Cormier)	Dionne (1988)
29	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Riviere)	Dionne (1988)
30	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Nyel)	Dionne (1988)
31	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Brule)	Dionne (1988)
36	Skotsko	Cairngorms	Raczkowka (2007)
32	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Musquaro)	Dionne (1988)
33	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Fontaine)	Dionne (1988)
34	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Baie du Milieu)	Dionne (1988)
35	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Ile Verte)	Dionne (1988)
Shluk 4			
5	Grónsko	Zackenbergl valley	Ruiz-Fernández (2020)
21	Finsko	Severní laponsko	Luoto (2002)
25	Špicberky	Fuglebekken	Szymański (2013)
26	Island	Víkurbakki	Webb (1972)
44	Etiopie	Simen mountains	Grab (2002)
6	Rusko	Tajmyr	Biasi (2005)
43	Antarktida	Seymour island	Souza (2014)
41	Wyoming	Medicine Bow Mountain	Billings (1959)
9	Kanada	Tuktoyaktuk	Brewert (1975)
40	Kanada	Inuvik	Crampton (1977)
12	Kanada	Banks island	French (1971)
22	Kanada	Banks island	Reynolds (2005)
20	Kanada	Ellesmere Island	Lewkowicz (2011)
Shluk 5			
19	Jižní Korea	Jeju island	Kim (2008)
45	Čína	Daqingshan Mountains	Grab (2005)
Shluk 6			
46	Uganda	Ruwenzori	Heinzelin (1951)



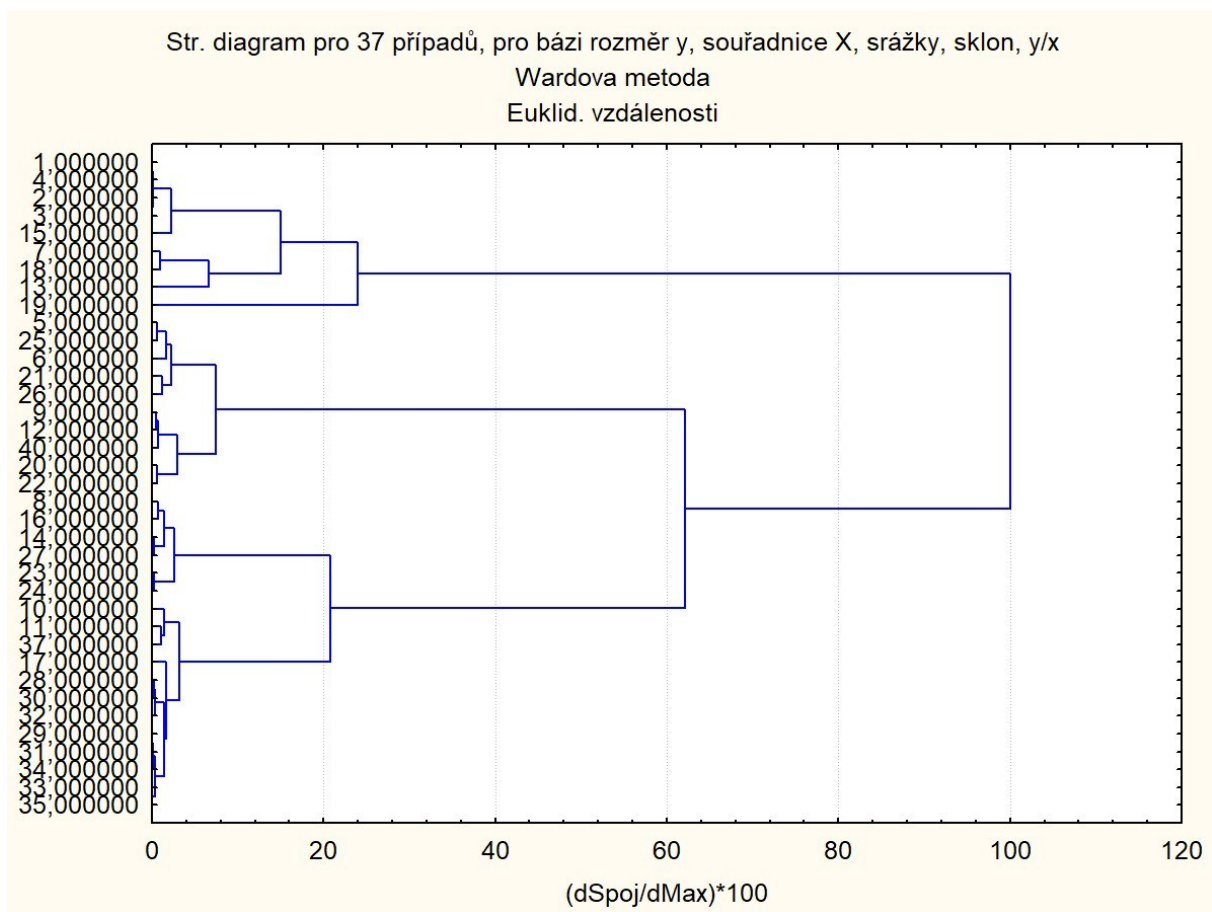
Obrázek 16: Shluky lokalit thufurů na základě MAAT, MAWT, MAST, teplot pod nulou a úhrnu srážek. Poznámka: na ose x jsou uvedeny v relativní škále eukleidovské vzdálenosti mezi příslušnými lokalitami thufurů, na ose y jsou uvedeny identifikátory (čísla) sledovaných lokalit, jejich seznam naleznete v příloze 1.

5.5.3. Kategorie podobnosti na základě vzájemně nekorelujících charakteristik (shluky na bázi)

Shluková analýza založená na proměnných délka vedlejší osy, zeměpisná šířka dané lokality, průměrný roční úhrn srážek, sklon svahu a protažení thufuru, které spolu vzájemně nekorelují (tab. 16, obr. 17) rozdělila soubor lokalit s výskytem thufurů do pěti klimaticko-topograficko-morfologických kategorií, které představují typologicky odlišné skupiny lokalit v rámci analyzovaného datového souboru.

Tabulka 16: Kategorie podobností na základě vzájemně nekorelujících charakteristik délka vedlejší osy, zeměpisná šířka dané lokality, průměrný roční úhrn srážek, sklon svahu a protažení thufuru. Poznámka: Číslo lokality se shoduje s číslem v Příloze 1.

Číslo lokality	Stát	Lokalita	Zdroj
Báze (Eukleid. vzdálenost 16)			
Shluk 1			
1	Lesotho	Mashai	Grab (2005, 1998)
4	Lesotho	Mafadi	Grab (1998)
2	Lesotho	Mohlesi	Grab (1998)
3	Lesotho	Popple peak	Grab (1998)
15	Česko	Jeseníky	Trembl (2010)
7	Nový Zéland	Old Man Range	Billings (1961)
18	Velká Británie	West Dartmoor	Killingbeck (2012)
13	Norsko	Okstindan	Gurney (2015)
Shluk 2			
19	Jižní Korea	Jeju island	Kim (2008)
Shluk 3			
5	Grónsko	Zackenbergl valley	Ruiz-Fernández (2020)
25	Špicberky	Fuglebekken	Szymański (2013)
6	Rusko	Tajmyr	Biasi (2005)
21	Finsko	Severní laponsko	Luoto (2002)
26	Island	Víkurbakki	Webb (1972)
9	Kanada	Tuktoyaktuk	Brewert (1975)
12	Kanada	Banks island	French (1971)
40	Kanada	Inuvik	Crampton (1977)
20	Kanada	Ellesmere Island	Lewkowicz (2011)
22	Kanada	Banks island	Reynolds (2005)
Shluk 4			
8	Jižní Afrika	Natal Drakensberg	Boelhouwers (1991)
16	Srbsko	Ponor	Milošević (2022)
14	Montana	Beartooth Plateau	Johnson (1962)
27	Slovensko	Vysoké Tatry	Raczkowka (2007)
23	Kanada	Rocky Mountains	Scotter (1982)
24	Kanada	Rocky Mountains	Scotter (1982)
Shluk 5			
10	Austrálie	Kosciusko	Costin (1973)
11	Norsko	Jotunheimen	Ellis (1983)
37	Rumunsko	Faragaš	Raczkowka (2007)
17	Japonsko	Poloostrov Nemuro	Ogata (2007)
28	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Cormier)	Dionne (1988)
30	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Nyel)	Dionne (1988)
32	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Musquaro)	Dionne (1988)
29	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Riviere)	Dionne (1988)
31	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Brule)	Dionne (1988)
34	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Baie du Milieu)	Dionne (1988)
33	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Fontaine)	Dionne (1988)
35	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Ile Verte)	Dionne (1988)



Obrázek 17: Shlukování lokalit studovaných thufurů na základě délky vedlejší osy, zeměpisné šířky dané lokality, průměrného ročního úhrnu srážek, sklonu svahu a protažení thufuru, neprokorelovaných charakteristik báze. Poznámka: na ose x jsou uvedeny v relativní škále eukleidovské vzdálenosti mezi příslušnými lokalitami thufurů, na ose y jsou uvedeny identifikátory (čísla) sledovaných lokalit, jejich seznam naleznete v příloze 1.

6. Diskuse

6.1. Polohové charakteristiky lokalit s výskytem thufurů

Výsledky provedených analýz ukazují na zřejmý fakt, že se půdní kopečky vyskytují převážně na severní polokouli. Tento jev je však nutné interpretovat s ohledem na geografické a historicko-vědecké souvislosti. Severní polokoule, pokud nebude v úvahu brána převážně zaledněná Antarktida, disponuje větší rozlohou pevnin, zejména v arktických a subarktických oblastech, kde se klimatické podmínky vhodné pro vznik thufurů běžně vyskytují. Zároveň je zde vyšší koncentrace vědeckých výzkumů, což zvyšuje pravděpodobnost popisu těchto geomorfologických jevů. Nelze tedy jednoznačně tvrdit, že by severní polokoule byla z klimatického hlediska výhodnější pro vznik thufurů, ale spíše, že nabízí více vhodného prostoru a je lépe prozkoumána.

Rozsah nadmořských výšek, ve kterých thufury vznikají, je velmi široký. Výskyt těchto tvarů nelze proto vysvětlovat samotnou nadmořskou výškou, ale je nutné brát v úvahu i další

faktory, jako je zeměpisná šířka, průměrná teplota vzduchu a jiné klimatické podmínky dané lokality. Thufury byly zaznamenány jak v nížinách daleko za polárním kruhem (Biasi, 2005; French, 1971; Lewkowicz, 2011), tak ve vysokohorském prostředí blízko rovníku (Heinzelin, 1951; Grab, 2002). Tvrzení Schunke a Zoltai (1988), že optimální pro vznik thufurů jsou roviny, či mírné svahy do 6° bylo potvrzeno. Průměrný sklon svahů pokrytých thufury v této studii činil 3,18°, takže většina zkoumaných thufurů skutečně vzniklo na rovinách, či mírných svazích.

Pokud jde o morfologii thufurů, délka hlavní osy odpovídá údajům uvedeným v literatuře. Schunke a Zoltai (1988) uváděli průměr základny kolem 100 cm, což se potvrzuje i v této práci, kde průměr u pravidelně kruhových thufurů rovněž dosahuje 100 cm. Výška thufurů je však nižší než očekávaná, zatímco literatura uvádí průměrnou výšku kolem 50 cm, výsledky této práce ukazují na průměrnou výšku přibližně 42 cm. Pokud jsou z úvah vyřazeny lokality, které mají extrémně malé minimální výškové rozměry, získáme základní statistiky očištěné o tyto extrémy (tab. 17). Zde byla jako hranice pro vyřazení zvolena minimální výška 10 cm, která je na hraně rozlišitelnosti od povrchu ovlivněného mrazovým vzdouváním. Jedná se o lokality 1, 13, 18, 19, 22, 23 a 24 z přílohy 1.

Tabulka 17: Morfometrické charakteristiky lokalit s výskytem thufurů s vyčleněním lokalit s minimální výškou thufuru nižší, než 10 cm.

	hlavní osa (cm)	vedlejší osa (cm)	výška (cm)	min. rozměr hlavní osy (cm)	max. rozměr hlavní osy (cm)	min. výška (cm)	max. výška (cm)
aritmetický průměr	104	99	47	84	140	42	76
medián	99	97	35	100	125	50	80
minimum	30	30	15	30	50	10	30
maximum	210	210	125	125	235	75	175
směrodatná odchylka	53	55	27	28	51	23	41
rozptyl	2861	2991	717	798	2623	526	1688

Touto úvahou zjistíme, že thufury očištěné o extrémně malé lokality vykazují průměrnou výšku 47 cm. Tento údaj je blíže údaji Schunke a Zoltai (1988), kteří uvádí průměrnou výšku 50 cm. Tento rozdíl mezi literaturou a zjištěními uváděnými v této práci tak může být vysvětlen množstvím lokalit s velmi nízkými thufury. V severní Kanadě lze nalézt podobně vypadající, avšak pouze kolem 10 cm vysoké kopečky, které jsou plně tvořeny jemnozrnným materiálem (Schunke a Zoltai, 1988). Tyto mohou být, například, snadno zaměněny za thufury, i když nenesou známky kryoturpace (Schunke a Zoltai, 1988). Pokud se soubor rozdělí na dvě skupiny, jednu se sklonem nad 2° a druhou do 2°, získáme průměrnou výšku 36 cm ve svažitém terénu a 47 cm na rovinách či lokalitách s mírným sklonem. Tedy tvrzení, že sklon svahu negativně koreluje s výškou thufuru se tímto potvrzuje (tab. 5). Předpoklad je, že za toto ovlivnění může právě soliflukční pohyb svahu.

6.2. Vztahy mezi enviromentálními charakteristikami a morfometrickými ukazateli

Z výsledků korelačních analýz vyplývá, že se zvyšující se nadmořskou výškou lokalit dochází ke snižování velikosti thufurů. Tento vztah lze doložit porovnáním dat z různých lokalit. Například thufury v Montaně (Johnson, 1962), nacházející se v nadmořské výšce 3050 m n. m., mají hlavní osu o průměru 45 cm a dosahují výšky 35 cm. Naproti tomu thufury ve Vysokých Tatrách (Raczkowska, 2007) ve výšce přibližně 1600 m n. m. vykazují délku hlavní osy 100 cm a výšku 60 cm, což potvrzuje hypotézu o negativní korelaci mezi nadmořskou výškou a velikostí thufurů. Nicméně je třeba zohlednit i další pozorované souvislosti, které mohou tento vztah modifikovat. Pozitivní korelace mezi velikostí thufurů a průměrnou teplotou vzduchu a zároveň srážkovými úhrny naznačuje, že teplejší a vlhčí prostředí podporuje růst větších thufurů. Tento závěr je podpořen srovnáním thufurů ze Zackenberg Valley v Grónsku (Ruiz-Fernández, 2020) a thufurů z Old Man's Range na Novém Zélandu (Billings, 1961). V chladnějším a sušším klimatu Grónska mají thufury základnu o 50 cm užší a jsou v průměru o 8 cm nižší než thufury v teplejším a vlhčím prostředí Nového Zélandu. Biasi (2005) uvádí, že prostor mezi kopečky bývá pokrytý častěji mechy, zatímco kopečky samotné travami. To vede k rozdílnému obsahu půdní vlhkosti a jinému vedení tepla skrze půdu. Vyšší teplota a vlhkost obecně přispívají větší k větší dekompozici organického materiálu (Biasi, 2005) a tak faktory teploty a srážek ovlivňují podmínky pro tvorbu půdy. Více materiálu vzniklého rozkladem umožňuje thufurům růst do větších rozměrů.

Thufury zvětšují své rozměry při posunu k nižším zeměpisným šířkám, kde jsou obecně vyšší teploty, a zároveň se zmenšují se stoupající nadmořskou výškou, neboť s ní dochází k poklesu teploty a změně dalších enviromentálních podmínek. V oblastech s vyšším úhrnem srážek vykazují thufury homogenní zamokření půdy, toto vede k vyššímu obsahu segregáčního ledu a tím přispívá k růstu thufurů (Schunke and Zoltai, 1988). Toto tvrzení koreluje se zjištěním, že vyšší průměrný roční úhrn srážek pozitivně ovlivňuje velikost půdních kopečků.

Z výsledků analýz rozptylu vyplývá, že thufury nacházející se pod horní hranicí lesa mají větší rozměry. Tento závěr podporuje předchozí tvrzení, že vyšší průměrné teploty podporují růst větších thufurů. Toto tvrzení lze podpořit také konkrétním srovnáním lokalit. Thufury v zálivu sv. Vavřince (Dionne, 1988), které se nacházejí pod horní hranicí lesa, mají průměrnou výšku 68 cm a průměrnou velikost hlavní osy 95 cm. Naproti tomu thufury v kanadských Skalnatých horách (Scotter, 1982), lokalizované nad horní hranicí lesa, vykazují průměrnou výšku pouze 19 cm a průměr 74 cm. Přestože obě lokality leží přibližně na 50. rovnoběžce, thufury nad hranicí lesa jsou menší, což potvrzuje význam teplotních podmínek pro jejich růst.

6.3. Souvislosti enviromentálních charakteristik s polohovými proměnnými

Z porovnání lokalit s výskytem thufurů na severních svazích s lokalitami jiné orientace vychází závěr, že severně orientované lokality leží ve vyšší nadmořské výšce než jinak orientované lokality. Vzhledem k převážné lokalizaci studovaných oblastí na severní polokouli lze tento vztah vysvětlit tak, že vyšší nadmořské výšky jsou blíže k rovníku a tím pádem vystaveny vyšším průměrným teplotám. Severně orientované svahy tak umožňují

půdě lépe promrzat a tím být příhodnější pro výskyt thufurů. Pokud je studovaná lokalita v příliš teplé oblasti, severní svah bude mít nejnižší průměrné teploty.

Větší rozměry thufurů na jižních svazích, a naopak menší velikost thufurů na svazích přikloněných k severu lze vysvětlit rozdíly v teplotních podmínkách. Jižní orientace umožňuje vyšší ohřev povrchu, čímž podporuje větší růst thufurů, v souladu s předchozími poznatky o pozitivní vazbě mezi teplotou a velikostí thufurů. Toto tvrzení lze konkrétně ilustrovat na údajích z kanadských Skalnatých hor (Scotter, 1982), kde byly thufury na severně orientovaných svazích o 4 cm nižší a o 23 cm menší v průměru než thufury na svazích orientovaných k jihu. Analýza rozptylu dále ukázala, že roviny mají v průměru vyšší teploty než svahy (tab. 8), což rovněž odpovídá zjištění, že thufury na rovinách mají v průměru větší rozměry (tab. 12).

6.4. Kategorizace geografické polohy na základě morfometrických proměnných

Shluková analýza ukazuje, že thufury lze rozdělit do čtyř hlavních kategorií. První skupinu tvoří thufury nacházející se ve vysokohorském prostředí. Tyto vysokohorské kopečky jsou popsány například v Lesothu (Grab, 1998) nebo v kanadských Skalnatých horách (Scotter, 1982; Johnson, 1962). Ve shodě s výsledky analýz jsou tyto thufury menší než ty, které se vyskytují v jiných typech prostředí. Například thufury na vrcholu Mashai v Lesothu dosahují průměrného rozměru os 49 cm a výšky 20 cm (Grab, 1998).

Druhou kategorií jsou thufury mírných zeměpisných šířek, které se ovšem nenacházejí ve velmi vysokých nadmořských výškách. Do této kategorie lze zařadit například thufury v Hrubém Jeseníku v České republice, kde průměrné rozměry základny dosahují 167 × 123 cm a výška činí 37 cm (Tremel et al., 2010).

Další vyčleněnou kategorií jsou arktické thufury vyskytující se v oblastech severně od polárního kruhu. Typickým příkladem jsou thufury na ruském poloostrově Tajmyr, které mají průměrnou velikost os 40 cm a výšku 20 cm (Biasi, 2005).

Poslední morfometrickou kategorií jsou thufury z nížinných, oceánsky ovlivněných oblastí, například v okolí zálivu svatého Vavřince (Dionne, 1988) a na japonském poloostrově Nemuro (Ogata, 2007). Tyto lokality jsou charakteristické nízkou nadmořskou výškou, blízkostí oceánu a vysokým ročním úhrnem srážek přesahujícím 1000 mm. Morfometricky se thufury z těchto oblastí podobají thufurům mírných šířek, ovšem vzhledem k oceánskému klimatu a vyšším průměrným ročním teplotám (v Japonsku kolem 6 °C, v Kanadě 6,5–12,5 °C) lze předpokládat, že jde spíše o rašelinné kopečky než o typické thufury vzniklé primárně působením mrazu. Grab (2005a) uvádí, že thufury mohou vzniknout pouze na místech, které umožňují sezónní promrzání půdy. Kopečky na lokalitách, které toto neumožňují, tak mohli vzniknout pomocí niválně-eolických procesů. Tento předpoklad je podpořen i faktem, že tyto lokality leží pod hranicí lesa a jsou dle satelitních snímků z Google Earth Pro v širším kontextu zalesněné, zde je tedy možné, že jde o fosilní útvary. Schunke a Zoltai (1988) uvádí stáří

některých thufurů na až 5000 let, les se zde tedy mohl vyvinout i později po vytvoření kopečků. Biasi (2005) uvažuje vliv globálního oteplování na lokality k oteplení náchylné.

6.5. Klimatická kategorizace thufurů

Z klimatického hlediska lze lokality rozdělit do několika skupin. První skupinu tvoří lokality s nadmořskou výškou v rozmezí od 400 do 3000 m n. m., avšak s velmi podobnou průměrnou roční teplotou kolem 1 °C a počtem týdnů s teplotami pod bodem mrazu kolem 40 týdnů ročně. Roční úhrn srážek v těchto lokalitách se pohybuje mezi 1500 a 2000 mm. Druhou skupinu představují lokality s různými průměrnými teplotami, ale podobným ročním úhrnem srážek kolem 700 mm. Třetí skupinu tvoří oblasti s průměrnými ročními srážkami přibližně 1000 mm a průměrným počtem 30 až 40 mrazivých týdnů v roce, přičemž výjimku v této skupině tvoří japonský poloostrov Nemuro, kde se vyskytuje pouze devět mrazivých týdnů ročně. Čtvrtou klimatickou kategorií jsou arktické lokality, kde je průměrná roční teplota pod bodem mrazu.

Kromě těchto čtyř hlavních skupin shluková analýza samostatně vyčlenila i dvě asijské lokality, jihokorejský ostrov Jeju a čínské pohoří Daqingshan. Obě lokality se vyznačují průměrnou roční teplotou přes 6 °C, kterou Grab (2005a) uvádí jako limitní pro úspěšný vývoj thufuru. Samostatnou kategorii představuje také ugandské pohoří Ruwenzori, které se vyznačuje extrémně vysokým ročním úhrnem srážek 4429 mm.

6.6. Kategorizace shluků na bázi

Shluky lokalit vyčleněné na základě komplexní shlukové analýzy, tedy na základě podobnosti ve všech analyzovaných metrikách (morfometrických, klimatických a polohových), opět ukazují na vznik několika větších, vzájemně podobných skupin.

V první kategorii se vyčlenily lokality, u nichž je největší míra podobnosti dána sklonem svahu, na kterém se thufury nacházejí. Zde došlo k zajímavému spojení – shlukují se lokality s odlišnou velikostí thufurů, kde jsou například vysokohorské thufury z Lesotha s průměrnou velikostí horizontální osy nepřesahující 50 cm (Grab 1998) společně s několika lokalitami v mírných zeměpisných šířkách, například v západním Dartmooru s horizontálním rozměrem přes 100 cm (Killingbeck, 2012). Přestože thufury v Lesothu jsou výrazně menší, než je běžné v jiných regionech, podobnost ve sklonu svahu byla natolik výrazná, že vedla k jejich začlenění do společného shluku.

Další významnou skupinou jsou lokality nacházející se v arktických oblastech, které byly spolehlivě odděleny od ostatních na základě charakteristiky nízkých teplot a dlouhého mrazového období.

Třetí vyčleněnou kategorií jsou vysokohorské oblasti, přičemž náhorní plošiny Lesotha tvoří samostatně identifikovanou podskupinu, zařazenou do první skupiny.

V další kategorii se, podobně jako v případě čistě morfometrické shlukové analýzy, shlukují lokality v okolí zálivu sv. Vavřince a japonského poloostrova Nemuro. Přestože bylo již dříve uvedeno, že tyto oblasti mohou být ovlivněny oceánským klimatem a pravděpodobně se v nich vyskytují spíše rašelinné kopečky než klasické thufury, v tomto případě k nim přibýly i další lokality, konkrétně thufury v Austrálii, Norsku a Rumunsku. Tento shluk lze vysvětlit podobností velikosti thufurů a podobnými klimatickými charakteristikami, jako jsou úhrny srážek a průměrné roční teploty vzduchu.

Samostatnou, zcela izolovanou kategorii tvoří jihokorejský ostrov Jeju, který se vyznačuje unikátními klimatickými podmínkami odlišujícími jej od všech ostatních zkoumaných lokalit.

Každá ze shlukových analýz ukazuje jiné výsledky, avšak jádro těchto výsledků je vždy stejné. Spolehlivě byly vyčleněny thufury v arktických lokalitách, thufury v mírném pásmu a vysokohorské thufury. Za nejlepší lze považovat poslední rozdělení do shluků na základě báze, a to proto, že v něm jako jediném byly uvažovány pouze vzájemně nekorelující proměnné, je tudíž nejméně náchylná na přecenění vazeb mezi vzájemně korelujícími údaji. Ovšem shluky na základě morfometrických údajů spojují více kategorie, kde jsou si existující thufury podobnější z hlediska vnějšího tvaru, také lépe dokázal vyčlenit potencionálně rašelinné kopečky od pravých thufurů.

7. Závěr

Tato práce se zaměřila na analýzu morfologických a klimatických charakteristik půdních kopečků a jejich vztah k enviromentálním podmínkám. Byla potvrzena obecná tendence, že s rostoucí nadmořskou výškou se velikost thufurů snižuje, což souvisí s poklesem teplot. Orientace svahu rovněž hraje významnou roli, jižní svahy a roviny, které přijímají více slunečního záření, vykazují větší thufury než svahy orientované k severu.

Shluková analýza umožnila vymezit různé morfometrické a klimatické typy thufurů, od malých vysokohorských forem po větší kopečky v mírných šířkách a v oceánských podmínkách. Specifické skupiny byly rovněž identifikovány na základě komplexních metrik báze, což podtrhuje rozmanitost podmínek, za kterých mohou thufury vznikat. Za nejlepší lze považovat shluky na základě morfometrických charakteristik, které nejlépe rozdělili thufury do kategorií s podobnými enviromentálními podmínkami.

Výsledky analýz potvrzují, že vznik thufurů je výsledkem interakce několika faktorů, přičemž dominantní roli hrají teploty vzduchu a úhrny srážek v daných lokalitách. V lokalitách v zálivu sv. Vavřince a v Japonsku je však pravděpodobné, že se jedná spíše o rašelinné útvary než o klasické periglaciální thufury, což ukazuje na nutnost pečlivého hodnocení každé lokality v širším environmentálním kontextu.

I přes získaná zjištění existují určitá omezení, především spojená s heterogenitou dostupných dat, rozdílnou metodikou měření a nedostatkem dlouhodobých terénních studií v některých

regionech. Další výzkum by se měl zaměřit zejména na procesní studium růstu a stability thufurů v závislosti na proměnlivých klimatických podmínkách a na monitoring dynamiky těchto forem v různých klimatických pásmech.

Hlavní zjištění práce:

- Velikost thufurů je ovlivněna více faktory současně, přičemž vyšší nadmořská výška vede k menším rozměrům, zatímco vyšší průměrné roční teploty a vyšší srážky podporují růst větších forem.
- Orientace svahu významně ovlivňuje morfologii thufurů – jižní svahy a roviny vykazují větší thufury než svahy orientované k severu.
- Shluková analýza potvrdila existenci různých morfologických a klimatických typů thufurů, přičemž některé skupiny potvrzují výskyt thufurů na místech bez permafrostu, které popisoval Grab (2005a).
- Procesy kryoturpace hrají klíčovou roli ve formování thufurů, přesto v určitých oblastech nelze vyloučit vznik rašelinných kopečků na základě odlišných procesních mechanismů.

Získané výsledky přispívají k lepšímu pochopení variability thufurů na globální úrovni a ukazují, že i relativně malé geomorfologické formy mohou sloužit jako citlivé indikátory klimatických změn.

8. Seznam literatury

BARSCHE, D., TRETER, U. (1976): Zur Verbreitung von Periglazial-Phänomenen in Rondane/Norwegen. *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography*. 1976, roč. 58, č. 1/2, s. 83-93.

BIASI, Ch., WANKE, W., RUSALIMOVA, O., KAISER, Ch., MEYER, H. et al. (2005): Microtopography and Plant-Cover Controls on Nitrogen Dynamics in Hummock Tundra Ecosystems in Siberia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2005, roč. 37, č. 4, s. 435-443. ISSN 1523-0430. Dostupné z: [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0435:MAPCON\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0435:MAPCON]2.0.CO;2). [cit. 2024-04-13].

BILLINGS, W.D., MARK, A.F. (1961): Interactions between Alpine Tundra Vegetation and Patterned Ground in the Mountains of Southern New Zealand. *Ecology*. 1961, roč. 42, č. 1, s. 18-31.

BILLINGS, W.D., MOONEY, H.A. (1959): An Apparent Frost Hummock-Sorted Polygon Cycle in the Alpine Tundra of Wyoming. *Ecology*. 1959, roč. 40, č. 1, s. 16-20.

BOELHOUWERS, J. (1991): Present-day Periglacial Activity in the Natal Drakensberg, Southern Africa: a Short Review. *Permafrost and Periglacial Processes*. 1991, č. 2, s. 5-12.

BREWER, R., PAWLUK, S. (1975): Investigations of Some Soils Developer in Hummocks of the Canadian Sub-Arctic and Southern-Arctic Regions 1. Morphology and Micromorphology. *Canadian Journal of Soil Science*. 1975, č. 55, s. 301-319.

BUDÍKOVÁ, M. (2009): Přednáška č.4: Shluková analýza. Masarykova univerzita Brno, Fakulta informatiky, učební texty. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/jaro2009/MAS02/um/7421238/Prednaska_c._4.pdf

COSTIN, A.B., WIMBUSH, D.J. (1973): Frost Cracks and Earth Hummocks at Kosciusko, Snowy Mountains, Australia. *Arctic and Alpine Research*. 1973, roč. 5, č. 2, s. 111-120.

CRAMPTON, C.B., (1976): A study of the dynamics of hummocky microrelief in the Canadian north. *Canadian Journal of Earth Science*. 1976, roč. 14, s. 639-649.

DIONNE, J.C., GÉRARDIN, V. (1988): Observations sur les buttes organiques de la Côte-Nord du golfe du Saint-Laurent, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*. 1988, roč. 42, č. 3, s. 289-301. ISSN 1492-143X. Dostupné z: <https://doi.org/10.7202/032737ar>. [cit. 2025-04-13].

ELLIS, S. (1983): Stratigraphy and ¹⁴C Dating of Two Earth Hummocks, Jotunheimen, South Central Norway Author(s): Stephen Ellis. *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography*. 1983, roč. 65, č. 3/4, s. 279-287.

- FARRISH, K., GRIGAL, D.F. (1985): Mass Loss in a Forested Bog: Relation to Hummock and Hollow Microrelief. *Canadian Journal of Soil Science*. 1985, č. 65, s. 375-378.
- FRENCH, H.M. (1971): Ice Cored Mounds and Patterned Ground, Southern Banks Island, Western Canadian Arctic. *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography*. 1971, roč. 53, č. 1, s. 32-38.
- GRAB, S. (1998): Non-Sorted Patterned Ground in the High Drakensberg, Southern Africa: Some New Data. *The Geographical Journal*. 1998, roč. 164, č. 1, s. 19-31.
- GRAB, S. (2002): Glacial and periglacial phenomena in Ethiopia: a review. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2002, roč. 13, č. 1, s. 71-76. ISSN 1045-6740. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ppp.405>. [cit. 2025-04-13].
- GRAB, S. (2005a): Aspects of the geomorphology, genesis and environmental significance of earth hummocks (thúfur, pounus): miniature cryogenic mounds. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 2005, roč. 29, č. 2, s. 139-155. ISSN 0309-1333. Dostupné z: <https://doi.org/10.1191/0309133305pp440ra>. [cit. 2025-04-13].
- GRAB, S. (2005b): Earth hummocks (thúfur): new insights to their thermal characteristics and development in eastern Lesotho, southern Africa. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2005, roč. 30, č. 5, s. 541-555. ISSN 0197-9337. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/esp.1150>. [cit. 2025-04-13].
- GURNEY, S.D., HAYWARD, S. (2015): Earth hummocks in north-east Okstindan, northern Norway: Morphology, distribution and environmental constraints. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*. 2015, roč. 69, č. 5, s. 299-309. ISSN 0029-1951. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00291951.2015.1084530>. [cit. 2024-04-13].
- HEINZELIN, J.D. (1952): Glacier Recession and Periglacial Phenomena in the Ruwenzori Range (Belgian Congo). *Journal of Glaciology*. 1952, roč. 2, č. 12, s. 137-140. ISSN 0022-1430. Dostupné z: <https://doi.org/10.3189/S0022143000034110>. [cit. 2025-04-13].
- JOHNSON, P.L., BILLINGS, W.D. (1962): The Alpine Vegetation of the Beartooth Plateau in Relation to Cryopedogenic Processes and Patterns. *Ecological Monographs*. 1962, roč. 32, č. 2, s. 105-135.
- KILLINGBECK, J., BALLANTYNE, C.K. (2012): Earth Hummocks in West Dartmoor, SW England: Characteristics, Age and Origin. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2012, roč. 23, č. 2, s. 152-161. ISSN 1045-6740. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ppp.1739>. [cit. 2025-04-13].
- KIM, T. (2008): Thufur and Turf Exfoliation in a Subalpine Grassland on Mt Halla, Jeju Island, Korea. *Mountain Research and Development*. 2008, roč. 28, č. 3/4, s. 272-278. ISSN 0276-4741. Dostupné z: <https://doi.org/10.1659/mrd.0890>. [cit. 2025-04-13].

KLADIVO, P. (2013): Základy statistiky. Studijní opory. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3841-2. Dostupné z: <http://geography.upol.cz/soubory/studium/e-ucebnice/978-80-244-3842-9.pdf>.

LEWKOWICZ, A.G. (2011): Slope hummock development, Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, Nunavut, Canada. *Quaternary Research*. 2011, roč. 75, č. 2, s. 334-346. ISSN 0033-5894. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.12.013>. [cit. 2025-04-13].

LUOTO, M.; SEPPÄLÄ, M. (2002): Characteristic of earth hummocks (pounus) with and without permafrost in finnish Lapland. *Geografiska Annaler*, 84A (2): 127 – 136 s.

MILOSEVIC, M., CALIC, J., KOVACEVIC-MAJKIC, J., MILIVOJEVIC, M. (2022): Thufur morphology within the Ponor depression (Stara Planina, Serbia). *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA*. 2022, roč. 72, č. 2, s. 117-132. ISSN 0350-7599. Dostupné z: <https://doi.org/10.2298/IJGI2202117M>. [cit. 2025-04-13].

NANDA, M.K. (2018): Winds and Global Circulation of Winds. Central university of Punjab, Bathinda.

OGATA, T. (2007): Morphology and Environmental Factors of Periglacial Hummocks in the Nemuro Peninsula, Northern Japan. *Geographical Review of Japan*. 2007, roč. 80, č. 5, s. 246-258.

PINTALDI, E., D'AMICO, M.E., SINISCALCO, C., CREMONESE, E., CELI, L. et al. (2016): Hummocks affect soil properties and soil-vegetation relationships in a subalpine grassland (North-Western Italian Alps). *CATENA*. 2016, roč. 145, s. 214-226. ISSN 03418162. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.014>. [cit. 2025-04-13].

RACZKOWSKA, Z. (2007): Współczesna rzeźba peryglacjalna wysokich gór Europy. Polska akademia nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Warszawa, 212 s.

RAYNOLDS, M.K. (2005): Addendum to the 2003 Green Cabin, Banks Island Data Report

RUIZ-FERNÁNDEZ, J., OLIVA, M., OTERO, X.L., GARCÍA-HERNÁNDEZ, C. (2020): Morphometric and sedimentological characteristics of Late Holocene earth hummocks in the Zackenberg Valley (NE Greenland). *Science of The Total Environment*. 2020, roč. 737. ISSN 00489697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140281>. [cit. 2025-04-13].

SCOTTER, G.W., ZOLTAI, S.C. (1982): Earth Hummocks in the Sunshine Area of the Rocky Mountains, Alberta and British Columbia. *Arctic*. 1982, roč. 35, č. 3, s. 411-416.

SCHUNKE, E., ZOLTAI, S.C. (1988): Earth hummocks. *Advances in Periglacial Geomorphology*. 1988, s. 247-278.

SOUZA, K.K.D., SCHAEFER, C.E.G.R., SIMAS, F.N.B., SPINOLA, D.N., DE PAULA, M.D. (2014): Soil formation in Seymour Island, Weddell Sea, Antarctica. *Geomorphology*. 2014, roč. 225, s. 87-99. ISSN 0169555X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.047>. [cit. 2025-04-13].

SZYMANSKY, W., SKIBA, S., WOJTUN, B. (2013): Distribution, genesis, and properties of Arctic soils: a case study from the Fuglebekken catchment, Spitsbergen. *Polish Polar Research*. 2013, roč. 35, č. 3, s. 289-304.

TARNOCAI, C., ZOLTAI, S.C. (1978): Earth Hummocks of the Canadian Arctic and Subarctic. *Arctic and Alpine Research*. 1978, roč. 10, č. 3, s. 581-594.

TREML, V., KŘÍŽEK, M. Vliv borovice kleče (*Pinus mugo*) na strukturní půdy české části Východních Sudet. *Opera Corcontica*. 2006, roč. 43, s. 45-56. ISBN 80-86418-58-8

TREML, V., KŘÍŽEK, M., ENGEL, Z. (2010): Classification of patterned ground based on morphometry and site characteristics: a case study from the High Sudetes, Central Europe. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010, roč. 21, č. 1, s. 67-77. ISSN 1045-6740. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ppp.671>. [cit. 2024-04-13].

TVRDÍK, J. (2008): Analýza Dat. Učební texty ostravské univerzity, Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita. 2008, 2. upravené vydání. Dostupné z: https://adoc.pub/uebni-texty-ostravske-univerzity-pirodovdecka-fakulta-analyz151737353650963.html#google_vignette

WEBB, R. (1972): Vegetation cover on Icelandic thúfur. *Acta Botanica Islandica*. 1972, č. 1, s. 51-60.

8.1. Další použité zdroje

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION- NOAA(2025): Globe DEM, (online). Dostupné z: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/report/s11/s11Gxii.html> [cit. 2024-04-11].

StatSoft (2025): STATISTICA (data analysis software system), verze 9. Dostupné z: www.statsoft.com.

TechGEO Mapping (2025): World Map Shapefile, (online). Dostupné z: <https://techgeo.org/download-world-map-shapefile-kml/> [cit. 2024-04-11].

Windy.com (2025): Meteoblue, (online). Dostupné z: <https://www.meteoblue.com/cs> [cit. 2024-04-11].

9. Přílohy

9.1. Příloha 1

číslo lokality	stát	lokalita	zeměpisná šířka	zeměpisná délka	nadmořská výška (m n.m.)	poloze vůči hranici lesa	sklon svahu (°)	orientace svahu	MAAT (°C)	meteostanice	MAWT (°C)	MAST (°C)	teploty pod nulou (týdny)	teploty nad nulou (týdny)
1	Lesotho	Mashai	29°41'40" S	29°08'05" E	2950	Above		3 západní	4,00	Vyšší vrcholky	0,0	10,0	13,0	39,0
2	Lesotho	Mohlesi	29°29' S	29°18'10" E	2880	Above		1 severní	4,00	Vyšší vrcholky	0,0	10,0	13,0	39,0
3	Lesotho	Popple peak	29°14'43" S	29°24'24" E	3170	Above		2 severní	4,00	Vyšší vrcholky	0,0	10,0	13,0	39,0
4	Lesotho	Mafadi	29°12'08" S	29°21'26" E	3360	Above		2 severní	4,00	Vyšší vrcholky	0,0	10,0	13,0	39,0
5	Grónsko	Zackenbergl valley	74°28'11,50" N	20°34'24,58" W	61	Above		4 východní	-9,00	Zackenbergl station	-19,0	-4,0	39,0	13,0
6	Rusko	Tajmyr	72°42' N	88°26' E	100	Above		2 západní	-14,00	Celý Tajmyr	-20,0	-3,0	39,0	13,0
7	Nový Zéland	Old Man Range	45°20' S	169°15' E	1584	Above		2 západní	1,10	Fraser Basin	3,5	9,5	13	39
8	Jižní Afrika	Natal Drakensberg	29°22'7,39" S	29°33'3,06" E	2900	Above		5 severní	15,00	Little Berg	10	20	9	43
9	Kanada	Tuktoyaktuk	69°24' N	133° W	15	Above		2 jižní	-8,00	Tuktoyaktuk	-20	4	35	17
10	Austrálie	Kosciusko	36°27'12,76" S	148°16'11,81" E	1905	Above		2 severní	3,00	Spencer's creek	-5	8	11	41
11	Norsko	Jotunheimen	61°33' N	8°15' E	1350	Above		5 jihozápadní	-2,00	Fanaraken	-11	7	43	9
12	Kanada	Banks island	71°37'28,93" N	123°14'15,34" W	75	Above		2 jižní	-13,50	Banks island	-26	-1	41	11
13	Norsko	Okstindan	66°0'33,19" N	14°13'13,35" E	700	Above		3 západní	0,00	Hattfjelldal	-4	7,5	28	24
14	Montana	Beartooth Plateau	45° N	109°30' W	3050	Above		2 severovýchodní	-0,50	Beartooth mountains	-7,5	6,5	35	17
15	Česko	Jeseniky	50°10'15,918" N	17°7'1,141" E	1400	Above		2 severní	1,70	Praděd	1,5	14	17	35
16	Srbsko	Ponor	43°14'46" N	22°48'48" E	1410	Above		3 západní	4,00	Topli Do	3	15	17	35
17	Japonsko	Poloostrov Nemuro	43°21'51,236" N	145°44'11,253" E	30	Under		0 rovina	6,00	Nemuro	2	11	15	37
18	Velká Británie	West Dartmoor	50°21' N	3°43' W	453	Under (no forest)		4 jihovýchodní	1,50	Princetown	7,5	13,5	0	52
19	Jižní Korea	Jeju island	33°21'38,179" N	126°31'51,873" E	1900	Under (no forest)		6 severovýchodní	10,00	Orimok	10	21	0	52
20	Kanada	Ellesmere Island	80° N	84°42' W	140	Above		8 jižní	-20,00	Eureka	-27	-9,5	4	48
21	Finsko	Severní laponsko	69°37' N	29°31' E	372	Above		2 západní	-2,00	Kevo	-7,5	6,5	32	20
22	Kanada	Banks island	73°13'22" N	119°33'13" W	59	Above		2 severní	-13,50	Banks island	-26	-1	41	11
23	Kanada	Rocky Mountains	51°04' N	115°47' W	2250	Above		5 severní	1,00	Rocky Mountains	-6	8,5	35	17
24	Kanada	Rocky Mountains	51°03'27" N	115°47'14" W	2215	Above		5 jižní	1,00	Rocky Mountains	-6	8,5	35	17
25	Špicberky	Fuglebekken	77° N	15°33' E	10	Above		3 jihozápadní	-4,40	Hornsund	-9	-1,5	41	11
26	Island	Vikurbakki	65°54' N	18°18' W	46	Under (no forest)		4 západní	2,00	Vikurbakki	-1,5	5	28	24
27	Slovensko	Vysoké Tatry	49°10' N	20°8' E	1600	Under (no forest)		8 jižní	7,50	Vysoké Tatry	1	14	20	32
28	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Cormier)	50°28'30" N	63°17' W	130	Under (no forest)		0 rovina	6,50	St Lawrence	2	11	17	35
29	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Riviere)	50°48' N	60°34' W	135	Under (no forest)		2 jižní	6,50	St Lawrence	2	11	17	35
30	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Nyel)	51°09'30" N	60°54'30" W	240	Under		0 rovina	7,50	St Lawrence	2	11	17	35
31	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Brule)	50°21' N	66°47'45" W	300	Under (no forest)		3 západní	8,50	St Lawrence	2	11	17	35
32	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Musquaro)	50°31'30" N	61°07' W	130	Under (no forest)		1 západní	9,50	St Lawrence	2	11	17	35
33	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Lac Fontaine)	50°29' N	59°47' W	50	Under (no forest)		0 rovina	10,50	St Lawrence	2	11	17	35
34	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Baie du Milieu)	51°26' N	57°30' W	10	Under (no forest)		8 severozápadní	11,50	St Lawrence	2	11	17	35
35	Kanada	Záliv sv. Lawrence (Ile Verte)	51°20'15" N	57°55'30" W	9	Under (no forest)		3 východní	12,50	St Lawrence	2	11	17	35
36	Skotsko	Cairngorms	57°2' N	3°35' W	1040	Above		5 severozápadní	5,50	Cairngorms	2	9	17	35
37	Rumunsko	Faragaš	45°32' N	24°44' E	2240	Above		8 východní	10,50	Faragaš	4	17	13	39
38	Itálie	Aosta valley	45°50'40" N	7°34'41" E	2160	Under (no forest)		4 jižní	3,10	Aosta valley	0	11,5	22	30
39	Minnesota	Marcell experimental forest	47°31'15,38" N	93°27'24,44" W	420	Under		2 východní	5,50	Marcell forest	-4	15	24	28
40	Kanada	Inuvik	68°20'31,39" N	133°40'47,33" W	15	Under		2 jihovýchodní	-6,00	Inuvik	-19	6,5	35	17
41	Wyoming	Medicine Bow Mountain	41°21' N	106°19' W	3356	Under (no forest)		0 rovina	7,00	Medicine bow mountain	-1,5	15	28	24
42	Norsko	Rondane	61°51'48,08" N	9°45'9,05" E	1350	Above		5 jižní	-1,50	Rondane	-7,5	6	32	20
43	Antarktida	Seymour island	64°2' S	56°7' W	1200	Above		2 jihozápadní	-8,40	SCAR READER	-18,7	-1,2	48	4
44	Etiopie	Simen mountains	13°15' N	38°12' E	3600	Above		6 jihozápadní	14,50	Simen mountains	14	15	0	52
45	Čína	Daqingshan Mountains	46°30' N	122°50' E	nepřesná lokalita	nepřesná lokalita	nepřesná lokalita	nepřesná lokalita	6,00	Daqingshan mountains	-6	17,5	24	28
46	Uganda	Ruwenzori	0°22' N	29°54' E	nepřesná lokalita	nepřesná lokalita	nepřesná lokalita	nepřesná lokalita	19,50	Ruwenzori	19,5	19,5	0	52

průměrné roční srážky (mm)	srážky ve formě sněhu (mm)	zimní srážky (%)	převažující směr větru	hlavní osa (cm)	vedlejší osa (cm)	výška (cm)	min. délka os (cm)	max. délka os (cm)	rozpětí délek os (cm)	min. výška (cm)	max. výška (cm)	rozpětí výšek (cm)	poměr kratší a delší osy	orientace thufurů	zdroj
1600	160	10		49	49	20	15	249	15-249	3	40	3-40	1,000		Grab (2005, 1998)
1600	160	10		43	42	18							0,977		Grab (1998)
1600	160	10		49	39	20							0,796		Grab (1998)
1600	160	10		62	48	22							0,774		Grab (1998)
367	330,0	90,0		77	58	22							0,753		Ruiz-Fernández (2020)
252				40	40	20	30	50	30-50	10	30	10-30	1,000		Biasi (2005)
1956			Severozápadní	125	125	30	100	150	100-150	20	40	20-40	1,000	Jihozápadní	Billings (1961)
800				60	60	35	50	70	50-70	20	50	20-50	1,000		Boelhouters (1991)
184				200	200	50							1,000		Brewert (1975)
1027				30	30	15							1,000		Costin (1973)
1000				150	150	40							1,000		Ellis (1983)
135				200	200	50							1,000		French (1971)
2500			Jihozápadní	107	107	28	9	240	9-240	11	52	11-52	1,000	Severní	Gurney (2015)
735				45	45	35							1,000		Johnson (1962)
1500			Západní	167	123	37							0,737		Tremí (2010)
814				62	59	31	38	104	38-104	17	48	17-48	0,952		Milošević (2022)
1163				56	46	35							0,821		Ogata (2007)
1974				140	140	20	80	200	80-200	5	35	5-35	1,000		Killingbeck (2012)
3356				121	121	18	42	200	42-200	9	27	9-27	1,000		Kim (2008)
76				60	50	30							0,833		Lewkowicz (2011)
395	198	50		210	210	65							1,000		Luoto (2002)
135				34	34	15	18	50	18-50	11	20	11-20	1,000		Reynolds (2005)
637				51	51	15	17	90	17-90	5	28	5-28	1,000		Scotter (1982)
637				74	74	19	30	130	30-130	10	33	10-33	1,000		Scotter (1982)
430				45	45	35							1,000		Szymański (2013)
480	100	21	Jihozápadní	125	125	38	50	200	50-200	25	50	25-50	1,000		Webb (1972)
725				100	60	60	90	110	90-110				0,600		Raczkowka (2007)
1090	420	40		180	180	125	125	235	125-235	75	175	75-175	1,000		Dionne (1988)
1090	420	40		113	113	70	100	125	100-125	60	800	60-80	1,000		Dionne (1988)
1090	420	40		160	160	75	100	220	100-220	50	100	50-100	1,000		Dionne (1988)
1090	420	40		113	113	83	100	125	100-125	75	90	75-90	1,000		Dionne (1988)
1090	420	40		138	138	113	100	175	100-175	75	150	75-150	1,000		Dionne (1988)
1090	420	40		95	95	68	75	115	75-115	50	85	50-85	1,000		Dionne (1988)
1090	420	40		113	113	65	100	125	100-125	50	80	50-80	1,000		Dionne (1988)
1090	420	40		98	98	75	85	110	85-110	60	90	60-90	1,000		Dionne (1988)
1089						35				30	40	30-40			Raczkowka (2007)
952				50	50								1,000		Raczkowka (2007)
880						23				15	30	15-30			Pintaldi (2016)
760						35									Farrish (1985)
200				150	150		120	180	120-180				1,000		Crampton (1977)
303															Billings (1959)
764															Barsch (1976)
250	200	80	Severní												Souza (2014)
7647															Grab (2002)
453															Grab (2005)
4429															Heinzlin (1951)

9.2. Příloha 2

	Zeměpisná šířka (°)	Zeměpisná délka (°)	nadmořská výška (m n.m.)	sklon svahu (°)	MAAT (°C)	MAWT (°C)	MAST (°C)	Teploty pod nulou (týdny)	průměrné roční srážky (mm)	hlavní osa (cm)	vedlejší osa (cm)	výška (cm)	min. délka os (cm)	max. délka os (cm)	min. výška (cm)	max. výška (cm)	poměr kratší a delší osy
souřadnice X (°)	1,00	-0,55	-0,70	-0,10	-0,31	-0,46	-0,45	0,49	-0,29	0,09	0,09	0,18	-0,04	-0,12	0,21	0,11	-0,02
souřadnice Y (°)	-0,55	1,00	0,30	0,09	-0,05	0,28	0,22	-0,42	0,56	0,02	0,01	-0,35	-0,09	0,16	-0,38	-0,20	-0,12
nadmořská výška (m n.m.)	-0,70	0,30	1,00	0,40	0,12	0,24	0,42	-0,16	0,22	-0,44	-0,44	-0,54	-0,51	0,03	-0,59	-0,28	-0,12
sklon svahu (°)	-0,10	0,09	0,40	1,00	0,16	0,18	0,28	-0,10	0,18	-0,26	-0,26	-0,48	-0,31	-0,15	-0,41	-0,24	0,01
MAAT (°C)	-0,31	-0,05	0,12	0,16	1,00	0,87	0,83	-0,70	0,32	0,45	0,45	0,52	0,51	0,25	0,53	0,19	0,01
MAWT (°C)	-0,46	0,28	0,24	0,18	0,87	1,00	0,91	-0,89	0,56	0,56	0,55	0,30	0,48	0,44	0,27	0,14	-0,10
MAST (°C)	-0,45	0,22	0,42	0,28	0,83	0,91	1,00	-0,84	0,56	0,33	0,33	0,16	0,28	0,27	0,14	0,08	-0,21
Teploty pod nulou (týdny)	0,49	-0,42	-0,16	-0,10	-0,70	-0,89	-0,84	1,00	-0,67	-0,51	-0,50	-0,22	-0,47	-0,43	-0,19	-0,11	0,06
průměrné roční srážky (mm)	-0,29	0,56	0,22	0,18	0,32	0,56	0,56	-0,67	1,00	0,40	0,40	-0,11	0,04	0,61	-0,15	-0,05	0,12
rozměr x (cm)	0,09	0,02	-0,44	-0,26	0,45	0,56	0,33	-0,51	0,40	1,00	1,00	0,66	0,78	0,65	0,59	0,24	0,22
rozměr y (cm)	0,09	0,01	-0,44	-0,26	0,45	0,55	0,33	-0,50	0,40	1,00	0,66	0,78	0,65	0,65	0,59	0,24	0,23
rozměr z (cm)	0,18	-0,35	-0,54	-0,48	0,52	0,30	0,16	-0,22	-0,11	0,66	0,66	1,00	0,82	0,22	0,96	0,39	0,12
min. x (cm)	-0,04	-0,09	-0,51	-0,31	0,51	0,48	0,28	-0,47	0,04	0,78	0,78	0,82	1,00	0,17	0,83	0,41	0,16
max. x (cm)	-0,12	0,16	0,03	-0,15	0,25	0,44	0,27	-0,43	0,61	0,65	0,65	0,22	0,17	1,00	0,08	0,00	0,17
min. z (cm)	0,21	-0,38	-0,59	-0,41	0,53	0,27	0,14	-0,19	-0,15	0,59	0,59	0,96	0,83	0,08	1,00	0,46	0,13
max. z (cm)	0,11	-0,20	-0,28	-0,24	0,19	0,14	0,08	-0,11	-0,05	0,24	0,24	0,39	0,41	0,00	0,46	1,00	0,07
poměr y/x	-0,02	-0,12	-0,12	0,01	0,01	-0,10	-0,21	0,06	0,12	0,22	0,23	0,12	0,16	0,17	0,13	0,07	1,00