

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geografie  
Studijní obor: Geografie a kartografie



Matouš Kovanda

## **Analýza databáze GLOFs**

The analysis of GLOFs database

Bakalářská práce

Vedoucí práce, školitel: prof. RNDr. Vít Vilímek, CSc.

Praha, 2023

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou 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, 23.04.2023

Podpis:

**Poděkování:**

Nejprve bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce prof. RNDr. Vítu Vilímkovi, CSc. za čas věnovaný konzultacím, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni, kamarádům a rodině kteří mě při vypracovávání této práce neustále podporovali a motivovali.

# ZADÁNÍ PRÁCE

## Název práce

Analýza databáze GLOFs

## Cíle práce

Jedním z cílů práce je vytvoření rešerše zaměřené na GLOFs (Glacial Lake Outburst Floods) s úmyslem přiblížit danou problematiku. Úlohou následující praktické části je analyzovat již existující globální databázi GLOFs s cílem porovnat jak výskyt případů GLOFs ve světě z hlediska různých aspektů, tak nalézt regionální specifika jednotlivých oblastí. Důraz je přitom kladen na regiony, kde dochází ke zvýšenému množství zaznamenaných GLOFs. Úlohou této analýzy je tak zároveň zdůraznit význam tvorby databází.

## Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Rešeršní část je sestavována především pomocí zahraniční odborné literatury. Ve výzkumné části jsou zpracovávána dostupná data, z již existující databáze GLOFs, a zároveň jsou získávána vlastní data pomocí webové aplikace Google Earth. Mezi zájmová území spadají oblasti se zvýšeným výskytem zaznamenaných GLOFs rozdělené do regionů Aljaška, Západní Kanada a USA, Střední Andy, Jižní Andy, Island, Skandinávie, Alpy, Kavkaz, Ťan-Šan, Centrální Asie I (západ), Centrální Asie II (východ) a Nový Zéland.

Datum zadání: 10.11.2021

Jméno studenta: Matouš Kovanda

Podpis Studenta:

Jméno vedoucího práce: prof. RNDr. Vít Vilímek, CSc.

Podpis vedoucího práce:

## **Analýza databáze GLOFs**

### **ABSTRAKT:**

V mnohých oblastech po celém světě dochází k událostem, kdy se z ledovcového jezera náhle uvolní velký objem vody. Tato událost, nesoucí název Glacial Lake Outburst Flood (GLOF), může v krátkém čase zaplavit rozsáhlou oblast nacházející se pod ledovcovým jezerem, čímž představuje velké riziko pro místní obyvatelstvo a infrastrukturu. Jelikož existuje mnoho různorodých faktorů, které mají vliv na výskyt, vývoj a způsob vzniku takové události, jsou GLOFs v této studii nejprve popsány, přičemž k popisu byla využita především zahraniční odborná literatura. Ve vlastní výzkumné části je následně vedena pozornost na analýzu globální databáze zaznamenávající proběhlé GLOFs. GLOFs jsou na základě místa vzniku rozděleny do oblastí, v rámci kterých je analyzováno jejich celkové množství za celé zaznamenané období, rozložení četnosti v jednotlivých desetiletích od počátku 20. století a rozložení četnosti v průběhu roku. Pozornost je vedena také na samotná ledovcová jezera, u kterých došlo k události GLOF. Analyzovány jsou zde typy a množství ledovcových jezer, způsob vylití vody z jezera a množství opakovaných GLOFs. Nakonec jsou výsledné hodnoty mezi jednotlivými oblastmi vzájemně porovnávány a jsou pozorovány jejich podobnosti či odlišnosti.

**Klíčová slova:** Databáze GLOFs, ledovcová jezera, vysokohorské oblasti, analýza, protržení hráze, přelití hráze

## **GLOFs database analysis**

### **ABSTRACT:**

In many areas around the world, events occur when a large volume of water is suddenly released from a glacial lake. This event, called a Glacial Lake Outburst Flood (GLOF), can flood a large area under a glacial lake in a short time, posing a major risk to local populations and infrastructure. As there are many diverse factors that influence the occurrence, development and mode of occurrence of such an event, GLOFs are first described in this study, using mainly international literature for the description. In the research part, attention is directed to the analysis of the global database recording the past GLOFs. The GLOFs are divided into areas based on the place of origin, in which their total abundance over the entire period of record, the distribution of abundance in each decade since the early 20th century, and the distribution of abundance within a year are analysed. Attention is also directed to the glacial lakes themselves where the GLOF event occurred. The types and number of glacial lakes, the manner in which the lake spills water, and the number of repeated GLOFs are analyzed. Finally, the resulting values between the different areas are compared with each other and their similarities or differences are observed.

**Keywords:** GLOFs database, glacial lakes, high-mountain areas, analysis, dam rupture, dam overflow

# OBSAH

<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>14</b>
<b>2 LEDOVCOVÁ JEZERA.....</b>	<b>15</b>
2.1 Obecná charakteristika.....	15
2.3 Výskyt.....	15
2.3.1 Výskyt ledovcem hrazených jezer.....	16
2.3.2 Výskyt morénou hrazených jezer.....	16
2.3.3 Výskyt hloubených jezer.....	16
2.3.4 Současné rozšíření.....	17
<b>3 NEBEZPEČÍ LEDOVCOVÝCH JEZER .....</b>	<b>18</b>
3.1 Glaciální nebezpečí.....	18
3.1.1 Vliv klimatických změn.....	18
3.2 Glacial Lake Outburst Flood .....	18
3.2.1 Příčiny .....	19
3.2.2 Následky .....	19
3.2.3 Historické GLOFs .....	20
3.2.3.1 Malá doba ledová .....	21
<b>4 METODIKA .....</b>	<b>22</b>
4.1 Analýza jednotlivých regionů.....	22
4.2 Vzájemné porovnání regionů .....	25
<b>5 ANALÝZA DATABÁZE GLOFs .....</b>	<b>27</b>
5.1 Severní Amerika.....	27
5.1.1 Aljaška.....	27
5.1.1.1 Jezerní hráze .....	27
5.1.1.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky .....	28
5.1.1.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce.....	29
5.1.1.4 Četnost opakování GLOFs .....	30
5.1.1.5 Shrnutí .....	32
5.1.2 Západní Kanada a USA .....	32
5.1.2.1 Jezerní hráze .....	33
5.1.2.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky .....	34
5.1.2.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce.....	35
5.1.2.4 Četnost opakování GLOFs .....	36

5.1.2.5 Shrnutí .....	37
5.2 Jižní Amerika .....	37
5.2.1 Střední Andy .....	37
5.2.1.1 Jezerní hráze .....	38
5.2.1.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky .....	39
5.2.1.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce.....	40
5.2.1.4 Četnost opakování GLOFs .....	42
5.2.1.5 Shrnutí .....	42
5.2.2 Jižní Andy .....	43
5.2.2.1 Jezerní hráze .....	44
5.2.2.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky .....	45
5.2.2.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce.....	46
5.2.2.4 Četnost opakování GLOFs .....	47
5.2.2.5 Shrnutí .....	48
5.3 Evropa .....	49
5.3.1 Island.....	49
5.3.1.1 Jezerní hráze .....	49
5.3.1.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky .....	51
5.3.1.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce.....	52
5.3.1.4 Četnost opakování GLOFs .....	53
5.3.1.5 Shrnutí .....	54
5.3.2 Skandinávie .....	54
5.3.2.1 Jezerní hráze .....	55
5.3.2.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky .....	56
5.3.2.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce.....	57
5.3.2.4 Četnost opakování GLOFs .....	58
5.3.2.5 Shrnutí .....	59
5.3.3 Alpy .....	59
5.3.3.1 Jezerní hráze .....	60
5.3.3.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky .....	61
5.3.3.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce.....	62
5.3.3.4 Četnost opakování GLOFs .....	64
5.3.3.5 Shrnutí .....	65
5.4 Asie .....	65
5.4.1 Kavkaz.....	65
5.4.2 Ťan-Šan .....	66
5.4.2.1 Jezerní hráze .....	67



5.4.2.2	Četnost GLOFs za jednotlivé roky .....	68
5.4.2.3	Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce.....	70
5.4.2.4	Četnost opakování GLOFs .....	71
5.4.2.5	Shrnutí .....	72
5.4.3	Centrální Asie I (západ) .....	72
5.4.3.1	Jezerní hráze .....	73
5.4.3.2	Četnost GLOFs za jednotlivé roky .....	74
5.4.3.3	Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce.....	75
5.4.3.4	Četnost opakování GLOFs .....	76
5.4.3.5	Shrnutí .....	77
5.4.4	Centrální Asie II (východ).....	77
5.4.4.1	Jezerní hráze .....	78
5.4.4.2	Četnost GLOFs za jednotlivé roky .....	79
5.4.4.3	Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce.....	80
5.4.4.4	Četnost opakování GLOFs .....	82
5.4.4.5	Shrnutí .....	82
5.5	Oceánie.....	83
5.5.1	Nový Zéland .....	83
<b>6</b>	<b>POROVNÁNÍ REGIONŮ .....</b>	<b>85</b>
6.1	Četnost ledovcových jezer a GLOFs .....	85
6.2	Závislost ledovcových jezer na zeměpisné šířce .....	86
6.3	Typy jezerních hrází a způsoby jejich selhání .....	87
6.4	Změny v četnosti GLOFs za pozorované období 1900–2019 .....	88
6.5	Výskyt GLOFs v průběhu roku.....	90
6.5.1	Závislost výskytu GLOFs na teplotě a na srážkách .....	90
6.5.2	Četnost zaznamenaných GLOFs v jednotlivých měsících.....	92
6.6	Četnost opakování GLOFs .....	93
<b>7</b>	<b>DISKUSE .....</b>	<b>95</b>
7.1	Faktory ovlivňující přesnost analýzy databáze GLOFs. ....	95
7.2	Zavedení možných protopatření .....	96
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>98</b>
<b>9</b>	<b>ZDROJE .....</b>	<b>100</b>

## SEZNAM GRAFŮ

<b>Graf 1:</b> Způsob přehrazení jezera v regionu Aljaška.....	28
<b>Graf 2:</b> Způsob selhání hráze v regionu Aljaška.....	28
<b>Graf 3:</b> Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Aljaška .....	29
<b>Graf 4:</b> Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Aljaška.....	30
<b>Graf 5:</b> Klimadiagram severní části Pobřežních hor ve výšce 826 m n. m. ....	30
<b>Graf 6:</b> Způsob přehrazení jezera v regionu Západní Kanada a USA.....	34
<b>Graf 7:</b> Způsob selhání hráze v regionu Západní Kanada a USA .....	34
<b>Graf 8:</b> Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Západní Kanada a USA.....	35
<b>Graf 9:</b> Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Západní Kanada a USA .....	36
<b>Graf 10:</b> Klimadiagram jižní části Pobřežních hor ve výšce 1896 m n. m. ....	36
<b>Graf 11:</b> Způsob přehrazení jezera v regionu Střední Andy.....	39
<b>Graf 12:</b> Způsob selhání hráze v regionu Střední Andy .....	39
<b>Graf 13:</b> Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Střední Andy .....	40
<b>Graf 14:</b> Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Střední Andy .....	41
<b>Graf 15:</b> Klimadiagram pohoří Cordillera Blanca ve výšce 4722 m n. m. ....	41
<b>Graf 16:</b> Způsob přehrazení jezera v regionu Jižní Andy .....	45
<b>Graf 17:</b> Způsob selhání hráze v regionu Jižní Andy.....	45
<b>Graf 18:</b> Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Jižní Andy .....	46
<b>Graf 19:</b> Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Jižní Andy.....	47
<b>Graf 20:</b> Klimadiagram Jihopatagonského ledovcového pole ve výšce 1353 m n. m. ....	47
<b>Graf 21:</b> Způsob přehrazení jezera v regionu Island .....	51
<b>Graf 22:</b> Způsob selhání hráze v regionu Island.....	51
<b>Graf 23:</b> Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Island .....	52
<b>Graf 24:</b> Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Island.....	53
<b>Graf 25:</b> Klimadiagram Národního parku Vatnajökull ve výšce 773 m n. m. ....	53
<b>Graf 26:</b> Způsob přehrazení jezera v regionu Skandinávie .....	56
<b>Graf 27:</b> Způsob selhání hráze v regionu Skandinávie.....	56
<b>Graf 28:</b> Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Skandinávie .....	57
<b>Graf 29:</b> Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Skandinávie.....	58
<b>Graf 30:</b> Klimadiagram jižní části Skandinávského pohoří ve výšce 1260 m n. m. ....	58
<b>Graf 31:</b> Způsob přehrazení jezera v regionu Alpy.....	61
<b>Graf 32:</b> Způsob selhání hráze v regionu Alpy .....	61
<b>Graf 33:</b> Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Alpy.....	62
<b>Graf 34:</b> Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Alpy .....	64
<b>Graf 35:</b> Klimadiagram vrcholu Furkastock ve švýcarských Alpách ve výšce 2664 m n. m.....	64
<b>Graf 36:</b> Způsob přehrazení jezera v regionu Ťan-Šan .....	68
<b>Graf 37:</b> Způsob selhání hráze v regionu Ťan-Šan.....	68
<b>Graf 38:</b> Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Ťan-Šan .....	69

<b>Graf 39:</b> Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Ťan-Šan .....	70
<b>Graf 40:</b> Klimadiagram ledovce Kemenskiy v západním Ťan-Šanu ve výšce 3771 m n. m. ....	71
<b>Graf 41:</b> Způsob přehrazení jezera v regionu Centrální Asie I (západ) .....	74
<b>Graf 42:</b> Způsob selhání hráze v regionu Centrální Asie I (západ) .....	74
<b>Graf 43:</b> Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Centrální Asie I (západ) .....	75
<b>Graf 44:</b> Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Centrální Asie I (západ) .....	76
<b>Graf 45:</b> Klimadiagram ledovce Braldu v pohoří Karákóram ve výšce 4486 m n. m. ....	76
<b>Graf 46:</b> Způsob přehrazení jezera v regionu Centrální Asie II (východ) .....	79
<b>Graf 47:</b> Způsob selhání hráze v regionu Centrální Asie II (východ) .....	79
<b>Graf 48:</b> Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Centrální Asie II (východ) .....	80
<b>Graf 49:</b> Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Centrální Asie II (východ) .....	81
<b>Graf 50:</b> Klimadiagram východních Himálají ve výšce 4894 m n. m. ....	81
<b>Graf 51:</b> Typ přehrazení jezera a způsob selhání hráze v okamžiku GLOF ve sledovaných regionech .....	88
<b>Graf 52:</b> Závislost zaznamenaných GLOFs na teplotě vzduchu v jednotlivých měsících .....	93
<b>Graf 53:</b> Četnost opakování GLOFs ve sledovaných regionech .....	94

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Bodové a intervalové odhady celkového globálního objemu ledovcových jezer.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2: Parametry z globální databáze GLOFs použité pro účely analýzy.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Aljaška.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Západní Kanada a USA.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Střední Andy.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Jižní Andy.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 7: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Island.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 8: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Skandinávie.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 9: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Alpy.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 10: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Kavkaz.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 11: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Ťan-Šan.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 12: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Centrální Asie I (západ).....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 13: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Centrální Asie II (východ).....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 14: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Nový Zéland.....</i>	<i>84</i>

## SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 1:</b> Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Aljaška .....	31
<b>Tab. 2:</b> Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Západní Kanada a USA .....	37
<b>Tab. 3:</b> Četnost opakování GLOFs u jednotlivých jezer v regionu Střední Andy .....	42
<b>Tab. 4:</b> Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Jižní Andy .....	48
<b>Tab. 5:</b> Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Island .....	54
<b>Tab. 6:</b> Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Skandinávie .....	59
<b>Tab. 7:</b> Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Alpy .....	65
<b>Tab. 8:</b> Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Ťan-Šan .....	72
<b>Tab. 9:</b> Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Centrální Asie I (západ) .....	77
<b>Tab. 10:</b> Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Centrální Asie II (východ) .....	82
<b>Tab. 11:</b> Četnost zaznamenaných jezer a GLOFs včetně data prvního záznamu ve sledovaných regionech .....	86
<b>Tab. 12:</b> Četnost jednotlivých typů ledovcových jezer, v závislosti na zeměpisné šířce sledovaných regionů .....	87
<b>Tab. 13:</b> Změny teplot vzduchu a četností GLOFs mezi lety 1900–2019 ve sledovaných regionech .....	90
<b>Tab. 14:</b> Závislost výskytu GLOFs na teplotě a na srážkách .....	92

# 1 ÚVOD

Glacial lake outburst flood (GLOF) je termín používaný pro náhlé uvolnění vody z jakéhokoli typu ledovcového jezera (přehrazeného nejčastěji ledem, skalním podložím či morénou) bez ohledu na jeho příčinu (Clague a Evans 2000). Mnoho těchto ledovcových jezer je přehrazeno nezpevněnými ledovcovými nánosy tvořícími nestabilní hráže, jejichž destrukce a následné GLOF může být vyvoláno různými mechanismy. Mezi mechanismy patří například mechanické pohyby vstupující do jezera jako jsou laviny, skalní řízení a sesuvy (Richardson a Reynolds 2000; Liu a kol. 2013). GLOFs ale mohou být také vyvolány extrémními meteorologickými jevy, mezi které patří zejména silné srážky způsobující degradaci hrází a přeplnění jezer (Worni a kol. 2012).

V minulosti si GLOFs při jednotlivých událostech vyžádaly tisíce lidských životů a způsobily vážné škody na infrastruktuře. Kvůli svému dalekosáhlému ničivému potenciálu tak představují v mnoha vysokohorských oblastech po celém světě významné nebezpečí (Vuichard a Zimmermann 1987). Vilímek a kol. (2014a) uvádějí, že na základě neustálé deglaciace (ústup ledovců), způsobené nárůstem globálních teplot, budou GLOFs představovat vážný problém i do budoucna. Z důvodu rychle se měnícího přírodního prostředí bude tvorba nových jezer v dynamickém vysokohorském prostředí nadále pokračovat (Emmer a kol. 2016). Vzhledem k tomu, že úplné pochopení procesu je pro posouzení nebezpečí klíčové, měl by být kladen zvláštní důraz na popis všech základních parametrů při náhlém uvolnění vody z jezer. Globální databáze GLOFs by mohla v tomto ohledu pomoci lépe nahlédnout do dané problematiky a pomoci tak zamezit dalším katastrofám.

Katastrofické události náhlého uvolnění vody z ledovcových jezer jsou hlášeny v mnoha vysokohorských oblastech (Sattar a kol. 2021). V této bakalářské práci jsou popisovány oblasti vybrané na základě analyzovaných dat pocházejících z databáze GLOFs (Veh a kol. 2022). Tyto oblasti jsou rozděleny do regionů s názvy Aljaška, Západní Kanada a USA, Střední Andy, Jižní Andy, Island, Skandinávie, Alpy, Kavkaz, Ťan-Šan, Centrální Asie I (západ), Centrální Asie II (východ) a Nový Zéland.

Cílem bakalářské práce je každý výše zmíněný region charakterizovat (kapitola 5), přičemž kromě popisu je také vedena pozornost na jejich vzájemné odlišnosti (kapitola 6). V rámci těchto regionů jsou u jednotlivých ledovcových jezer zjišťovány zejména typy hrází, způsoby vylití vody z jezera, data samotných výskytů GLOFs a četnost jejich opakování.

## 2 LEDOVCOVÁ JEZERA

### 2.1 Obecná charakteristika

Ledovcové jezero vzniká v erozních prohlubních způsobených působením ledovce na zemský povrch. Zdrojovou oblastí jezerní vody v této depresi jsou srážky (Yao a kol. 2018) a především tání ledovce, které jezero přehrazuje, či tání přilehlých ledovců (Singh a kol. 2011), což značí, že dominantním faktorem při tvorbě těchto jezer je zalednění (Yao a kol. 2018).

Ledovcová jezera se obecně vyskytují ve všech zaledněných krajinách a jsou zpravidla přehrazena ledovcem nebo morénou, případně se vyskytují v proglaciálních (nacházejících se před čelem ledovce) depresích způsobených ledovcovým přehloubením horninového podloží. Rozloha jezer se pohybuje od několika metrů čtverečních až po milion kilometrů čtverečních a mohou pojmout až desítky milionů metrů krychlových vody. U ledovcových jezer mohou navíc v důsledku narušení hráze vzniknout průtoky vody řádově vyšší, než jsou průměrné kulminační průtoky způsobené srážkami (Singh a kol. 2011).

Změny klimatu v posledních desetiletích významně ovlivnily životní cyklus ledovců (Jain a kol. 2012). V důsledku oteplování klimatu tak dochází v mnoha zaledněných oblastech k ústupu ledovců, větší míře tání sněhu a ledu (Maurer a kol. 2019) a ke zdatelné podpoře vzniku a expanze ledovcových jezer (Zhang a kol. 2015).

### 2.3 Výskyt

Ledovcová jezera, u kterých hrozí přelití (*náhlé vylití velkého objemu vody z ledovcového jezera prostřednictvím přelití jeho hráze*) či protržení (*jakékoliv narušení soudržnosti hráze, přehrazující ledovcové jezero, vedoucí k náhlému vylití velkého objemu vody*) hráze, jsou nejčastěji hrazená ledovcem nebo morénou a mohou se vyskytovat v zaledněné krajině všech zeměpisných šířek (Singh a kol. 2011). Případně se nacházejí za stabilními skalními stupni či kombinovanými hrázemi (viz Kapitola 6.3). Tato jezera představující potenciální riziko, zejména pro osídlené lokality v horských oblastech, se nacházejí především v Severní Americe např. ve Skalnatých a Pobřežních horách (Clague a Evans 2000), Jižní Americe např. v pohoří Andy (Carey 2005), Evropě zejména na Islandu, ve Skandinávii a v Alpách (Björnsson 2003; Breien a kol. 2008; Emmer a kol. 2015), Asii např. v pohoří Altaj, Kavkaz, Ťan-šan, Karákóram a Himálaje (Stokes a kol. 2007; Fujita a kol. 2008; Chen a kol. 2010; Janský a kol. 2010; Agatova a kol. 2020) a na Novém Zélandu (Carrivick a kol. 2022).

### 2.3.1 Výskyt ledovcem hrazených jezer

Ledovcem hrazená jezera se vyskytují v nadmořských výškách od úrovně hladiny moře v polárních oblastech, až po vysoké nadmořské výšky v extrémních vysokohorských oblastech. Největší jezera tohoto typu se nacházejí většinou do 1 500 m n. m. pod hranicí rovnovážné čáry (*hranice, která v rámci hmotnostní bilance ledovce odděluje akumulární oblast od oblasti ablační, Oien a kol. 2020*), kde může být tající voda z rozsáhlých povodí přehrazena přírodními hrázemi (Singh a kol. 2011). Ledovcem hrazená jezera se nachází například v pohoří Karákóram (35°–36° s. z. š.), kde vznikají zejména postupujícími přítokovými ledovci (Chen a kol. 2010). Další hlavní oblasti rozšíření tohoto typu ledovcových jezer jsou Aljaška (Rick a kol. 2022), Kanada (Clarke, Mathews 2011), Norsko (Breien a kol. 2008), Grónsko (Russell 2007), Island (Björnsson 2003) a evropské Alpy (Emmer a kol. 2015). Mezi méně zkoumané oblasti s ledovcem hrazenými jezery patří Arktida a Antarktida (Blachut a McCann 1981).

### 2.3.2 Výskyt morénou hrazených jezer

Morénou hrazená jezera se vyskytují především v peruánských Andách v pohoří Cordillera Blanca (8°–10° j. z. š.) (Carey 2005). Dále se v Jižní Americe severněji od 8° j. z. š. ledovcová jezera v rámci vnitřních tropů většinou nenachází, protože jsou tyto oblasti nevhodné pro vznik morénových a ledovcově přehrazených jezer kvůli výskytu strmých sopečných svahů s malým vrcholovým zaledněním. Další oblast rozšíření morénových jezer se nachází v subtropické šířce mezi 28°–34° s. z. š. v Himálajské oblasti, zejména v Nepálu, Bhútánu a Číně. Morénami přehrazená jezera vznikají většinou v dolní části ablační oblasti ledovců. Některá z nejvýše položených morénových jezer se objevují v Himálaji ve výšce 5 700 m n. m. (jezera Longbasaba a Pida, Xin a kol. 2008) (Singh a kol. 2011).

### 2.3.3 Výskyt hloubených jezer

Ledovcem hloubené deprese v horninovém podloží daly za vznik jezerům, která jsou obklopena skalními stěnami zadržujícími vodu ve vzniklé sníženině. Byly vytvořeny zejména modelací čtvrtohorních ledovců, což odpovídá jejich výskytu. Mezi lokality, kde se taková jezera nachází lze zařadit například oblasti středních zeměpisných šířek s relativně menší zaledněnou plochou a kratšími ledovci (Singh a kol. 2011; Yao a kol. 2018) jako jsou například lokality v evropských Alpách (Emmer a kol. 2015) či kanadských Skalnatých horách (O'Connor a Costa 1993).

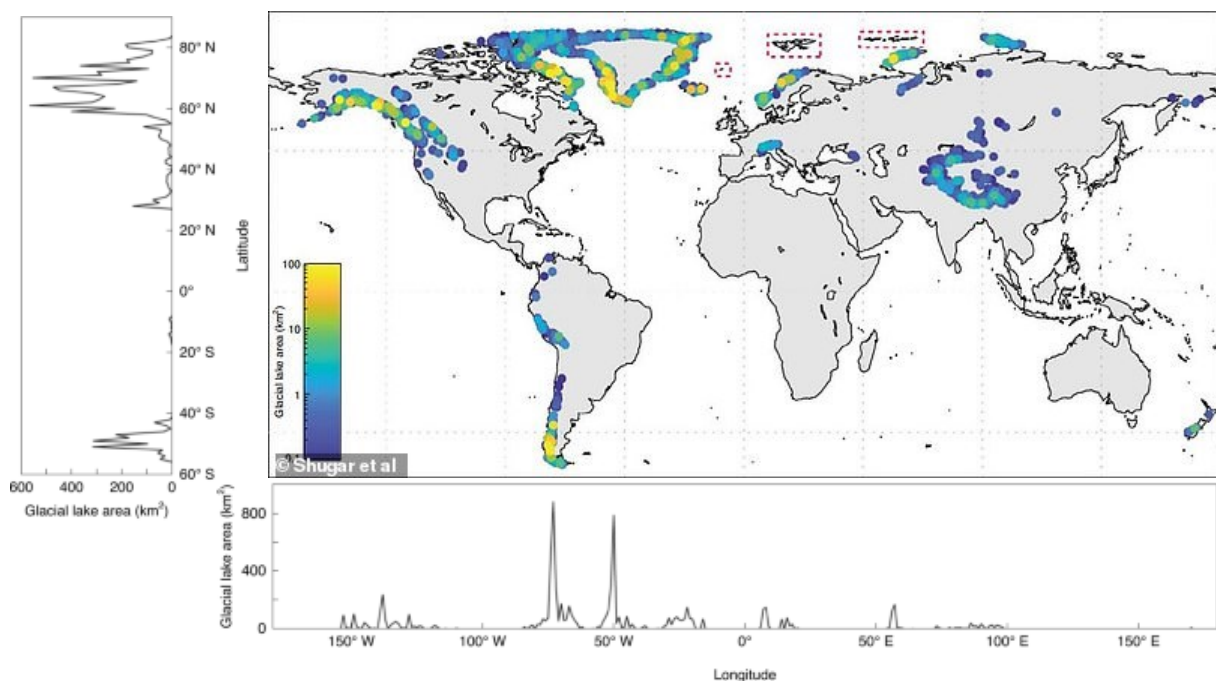


### 2.3.4 Současné rozšíření

Shugar a kol. (2020) analyzovali více než 250 000 snímků pořízených mezi lety 1990 a 2018 satelity Landsat, ze kterých vytvořili mapu s odhady celkového objemu ledovcových jezer, s výjimkou těch v Antarktidě (viz Obr. 1). Dále ze snímků zjistili, že za poslední tři desetiletí vzrostl počet ledovcových jezer z 9 414 na 14 394. Celková plocha jezer se tak zvýšila o 51 % a jejich objem o 48 %. Navíc bylo výzkumným týmem zjištěno, že objemy jezer se nejvíce zvyšují ve vysokých zeměpisných šířkách. Množství vody bylo v ledovcových jezerech v roce 2018 takové, že pokud by se veškerá v nich obsažená voda dostala do světového oceánu, zvýšila by se jeho hladina o 0,43 milimetru.

Objem ledovcových jezer rychle roste v reakci na změnu klimatu a ústup ledovců, což postupně představuje stále větší nebezpečí spojené s protržením jejich hrází. Nejvyšší riziko záplav pocházejících z ledovcových jezer hrozí zejména v horských oblastech, kde je voda přehrazena nestabilními hrázemi složenými z ledovcových úlomků. Náhlé vyvalení vody z ledovcového jezera v horské oblasti by pak mohlo způsobit katastrofální záplavy (Shugar a kol. 2020) ohrožující místní infrastrukturu a obyvatelstvo (Vuichard a Zimmermann 1987).

Obr. 1: Bodové a intervalové odhady celkového globálního objemu ledovcových jezer (Shugar a kol. 2020)



## **3 NEBEZPEČÍ LEDOVCOVÝCH JEZER**

### **3.1 Glaciální nebezpečí**

Glaciální nebezpečí je spojeno s ledovci a ledovcovými jezery ve vysokohorských oblastech (Jain a kol. 2012). Mezi dva hlavní typy ledovcového nebezpečí patří přímé a nepřímé působení ledovce. Přímé působení zahrnuje bezprostřední vliv sněhu a ledu, kterého se týkají události jako jsou například laviny nebo vylití vody z ledovcového jezera. Nepřímé působení ledovce je spojeno s vedlejšími důsledky glaciálního útvaru nebo procesu a může zahrnovat například problémy s vodními zdroji spojené s úbytkem ledovců způsobeným globálním oteplováním. Některé případy vzniklého glaciálního nebezpečí mohou mít významný dopad na společnost v krátkém časovém měřítku (minuty/dny) od jejich vzniku (Richardson a Reynolds 2000).

#### **3.1.1 Vliv klimatických změn**

Juřicová a Fratianni (2018) ve své práci uvádí přehled klimatických změn ve vztahu k hmotnostní bilanci ledovců, přičemž zdůrazňují opožděnou reakci ledovců na měnící se klimatické podmínky. I přesto že dochází k nárůstu průměrné teploty vzduchu o +0,26 °C každých deset let (Mark a Seltzer 2005), změny teplot a srážek zcela nevysvětlují silný ústup ledovců během několika posledních desetiletí. Dle poznatků Juřicové a Fratianni (2018) je vztah mezi chováním ledovců a změnou klimatu velmi komplikovaný. Ústup ledovce je totiž ovlivněn mnoha charakteristikami jako jsou místní morfologické podmínky (např. orientace svahů vůči Slunci), místní a regionální klima a globální klimatické podmínky.

V mnoha zaledněných oblastech je vlivem oteplování klimatu a ústupu ledovců detekováno zvyšující se množství tání sněhu a ledu (Lutz a kol. 2014). V důsledku toho se nejen vytvořilo velké množství ledovcových jezer (Jain a kol. 2012), která jsou zahrazena stabilními či nestabilními hrázemi (Vilca a kol. 2021), ale také se v nich začala zvyšovat akumulace vody. Kvůli tomu se mohou stát jezera nebezpečnějšími, protože mohou být náchylnější k prolomení či přelití hráze (Jain a kol. 2012), což může vést ke složitým a potenciálně katastrofickým následným procesním řetězcům (Vilca a kol. 2021). Jedná se tak o vážnou a potenciálně rostoucí hrozbu pro životy a infrastrukturu ve většině vysokohorských oblastech světa (Allen a kol. 2016).

### **3.2 Glacial Lake Outburst Flood**

Glacial lake outburst flood (GLOF) je náhlé (Dubey a Goyal 2020) a v některých případech opakované (Singh a kol. 2011) uvolňování velkého množství akumulované vody

z ledovcových jezer (Carrivick a Rushmer 2006) vytvořených buď: pod, před, na boku nebo na povrchu ledovce. Související hráze mohou být složeny z ledu, morény nebo skalního podloží (Allen a kol. 2016). Intenzita záplav pocházejících z ledovcového jezera se odvíjí od jeho objemu, dále pak od výšky, šířky a složení hráze, morfologie a vegetace údolí a dostupnosti sedimentů jak v jezeře, tak po proudu (Richardson a Reynolds 2000).

GLOF se vyznačuje vysokým vrcholovým průtokem a krátkým trváním (Richardson a Reynolds 2000). Zejména větší jezera představují v horských oblastech větší nebezpečí, protože voda je často přehrazena nestabilními ledovcovými úlomky, díky čemu se může hráz náhle provalit a způsobit katastrofické záplavy (Shugar a kol. 2020).

### **3.2.1 Příčiny**

Vznik GLOF může mít několik příčin mezi které patří převážně dynamičtí činitelé (náhlý pohyb vody/materiálu vstupujícího do jezera) (Carrivick a Tweed 2013). Mezi nejvýznamnější takové činitele patří různé typy svahových pohybů jako např. skalní řícení, laviny či sesuvy (Emmer a Cochachin 2013), ke kterým může dojít v případě, že se jezero nachází poblíž nestabilních svahů. Mezi další častější dynamický činitel lze zařadit například velký objem vody vstupující do ledovcového jezera z jiného jezera, nacházejícího se v povodí výše proti proudu. Jinou formou činitelů jsou již méně časté autodestruktivní poruchy (částečné či úplné narušení hráze), mezi které patří například seismická aktivita, eroze hráze při výtoku či extrémní klimatické jevy (Carrivick a Tweed 2013).

Spouštěcích mechanismů je mnoho, přičemž jejich vzdálenost od vodní plochy, vzájemné propojení a vzácnost výskytu ztěžují posouzení potenciálního nebezpečí pro daná jezera (Dubey a Goyal 2020). Z toho důvodu je většina předpokladů pro jednotlivé GLOFs spíše teoretická, protože přímá pozorování destrukce hrází jsou velmi vzácná (Singh a kol. 2011).

### **3.2.2 Následky**

Náhlé vylití velkého množství vody z jezera může způsobit záplavu, která může trvat několik hodin až dnů (Singh a kol. 2011), v údolí nacházejícím se ve směru proudění (Jain a kol. 2012). Proudění vody může být natolik silné, že se může díky transportu velkého množství suti vyskytovat ve formě bahnotoku, čímž může vytvářet ještě vyšší potenciální nebezpečí (Singh a kol. 2011). GLOFs opakovaně způsobují ztráty na lidských životech (Jain a kol. 2012), dále ohrožují živobytí místního obyvatelstva a ekonomický rozvoj, ničí majetek, půdu a životně důležitou infrastrukturu (Richardson a Reynolds 2000). Geomorfologické dopady a škody způsobené záplavou mohou navíc nastat desítky až stovky kilometrů od jezera, ze kterého byla voda vylita (Singh a kol. 2011).

Výskyty potenciálních GLOFs jsou zkoumány v různých částech světa, a to nejen kvůli možnému riziku záplav v oblastech s rostoucí hustotou osídlení, ale také kvůli skutečnosti, že jezera, která mohou zapříčinit povodně, jsou důležitým zdrojem vody pro místní populaci (Xin- a kol. 2008). K nejvyšším škodám na dolním toku způsobeným záplavami dochází v případě, když není místní obyvatelstvo varováno ohledně potenciálního nebezpečí, které může ledovcové jezero zapříčinit (Schwanghart a kol. 2016). Pro zvýšení bezpečnosti by se proto měly označit potenciálně ohrožené lokality dříve, než bude jakékoliv jezero klasifikováno jako nebezpečné (Richardson a Reynolds 2000).

Pro přesnější odhalení potenciálně nebezpečných ledovcových jezer musí být v jejich okolí analyzovány možné příčiny, které by mohli záplavu způsobit. Analýza takových příčin by neměla proběhnout pouze v blízkém okolí jezera, ale v rámci velkého prostorového měřítka, které není omezeno administrativními či politickými hranicemi (Allen a kol. 2016).

S tím, jak se lidské aktivity rozšiřují dále do vysokohorských oblastí světa, stávají se stále více ohroženy ledovcovým nebezpečím (Richardson a Reynolds 2000). Ve světě se ovšem vyskytují i oblasti, u kterých ústup ledovců způsobil zánik ledovcových jezer či snížil jejich nebezpečnost, čímž došlo k poklesu ledovcových povodní (Singh a kol. 2011).

Výzkum GLOFs se v posledních letech exponenciálně rozrostl, přičemž zvýšená pozornost je věnována nízkopříjmovým, hustě osídleným horským oblastem, jako jsou oblasti ve vysokohorské Asii (Nepál, Indie) a tropických Andách (Peru, Bolívie) (Emmer 2018). S ohledem na předpokládané oteplování a pokračující ústup ledovců (Lutz a kol. 2014) se pozornost v poslední době přesunula za hranice sledování a hodnocení stávajících hrozeb GLOFs směrem k předvídání, kde se objevují nová, potenciálně problematická jezera (Allen a kol. 2016).

### **3.2.3 Historické GLOFs**

Vylití vody z ledovcových jezer přispělo k největším a geomorfologicky nejrozsáhlejším záplavám na světě. Mezi nejvýznamnější patří povodňové události ve čtvrtohorách (O'Connor a Costa 2004), které během pouhých několika hodin až dnů způsobily gigantické proměny krajiny podobně jako je tomu při sopečných erupcích, tsunami nebo zemětřeseních (Singh a kol. 2011). Účinky historických GLOFs byly významné i ve vzdálenosti větší než 200 km od příslušných zdrojových jezer (Richardson a Reynolds 2000).

Na základě výskytu ledovcových jezer a s nimi spojených záplav lze pozorovat mnoho ukazatelů, mezi které patří zejména historický vývoj krajiny v období pleistocénu a holocénu a historický rozsah zalednění. Procesy spojené s ledovcovými jezery jsou tedy důležitým klíčovým paleoklimatickým indikátorem pro rekonstrukci krajinného prostředí a minulého klimatu (Singh a kol. 2011).

### 3.2.3.1 Malá doba ledová

Typicky se ledovcové povodňové katastrofy nebo vnímané hrozby v posledních desetiletích týkaly jezer hrazených čelní nebo boční morénou, které se vytvořily během Malé doby ledové (období mezi lety 1400 a 1900). Vnitřní svahy bočních morén se u těchto jezer vyznačují středně až velmi strmými svahy ( $55^{\circ}$ – $80^{\circ}$ ) (Porter 2007) se stopami eroze (Vilca a kol. 2021).

Morénové přehrady z Malé doby ledové jsou považovány za jedny z nejnebezpečnějších, zvláště když se za morénami tvoří ploché nebo zahloubené prostory, které hostí nová jezera (Clague a Evans 2000). Obecně platí, že hrozba z takových jezer se může v průběhu času snižovat, a to za předpokladu, že by se již nejnestabilnější hráze protrhly. Nicméně například Himálaje jsou označovány jako jedna z oblastí, kde se nadále vyvíjejí velká proglaciální (*nacházející se před čelem ledovce*) jezera uvězněná za morénami pocházejícími z Malé doby ledové (Clague a O'Connor 2021).

## 4 METODIKA

V následující kapitole jsou postupně popisovány jednotlivé regiony, u kterých dochází k povodním typu GLOF, ohrožujících zejména místní obyvatelstvo a infrastrukturu. Cílem této práce je nejen definovat pomocí vytvořených analýz lokální specifika vedoucích k případům vyhlížení vody z ledovcového jezera, ale také jednotlivé regiony vzájemně porovnat. Pro uskutečnění takové analýzy byla použita globální databáze GLOFs (Veh a kol. 2022) na základě které bylo možné získat data, potřebná pro vytvoření výstupů charakterizujících ledovcové povodně v jednotlivých oblastech. Výstupy byly vytvořeny převážně v podobě grafů prostřednictvím tabulkového softwaru Excel, do kterého byla data ze světové databáze importována.

### 4.1 Analýza jednotlivých regionů

Z databáze GLOFs (Veh a kol. 2022) byly pro účely analýzy použity parametry: **region**, **typ hráze přehrazující ledovcové jezero**, **způsob selhání hráze (protržení či přelití hráze s následným vznikem GLOF)**, **datum, kdy došlo k záplavě** a **zeměpisné souřadnice** (viz Obr. 2). **Nadmořská výška** byla u každého jezera vzhledem k chybějícím údajům v databázi zjišťována prostřednictvím webové aplikace Google Earth (Google 2022).

Obr. 2: Parametry z globální databáze GLOFs použité pro účely analýzy (Veh a kol. 2022)

Major RGI region	Lake type	Longitude	Latitude	Date	Min. date	Max. date	Outburst mechanism
All	All	All	All				All
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1922			subglacial
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1923			subglacial
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1924			subglacial
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1925			subglacial
Southern Andes	ice	-69.98	-33.11999999999999	1926			
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1926			subglacial
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1927			subglacial
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1928			subglacial
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1929			subglacial
Southern Andes	ice	-73.95999999999999	-49.03		1929	1945	
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1930			subglacial
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1931			subglacial
Southern Andes	ice	-73.256578	-47.28773	1932			subglacial
Low Latitudes	moraine	-76.9379	-10.2333	1932-03-14			breach

Pomocí parametru **region**, popisujícího výskyt ledovcových jezer v různých světových regionech, byla jednotlivá jezera rozdělena do oblastí nesoucí názvy Aljaška, Západní Kanada a USA, Střední Andy, Jižní Andy, Island, Skandinávie, Alpy, Kavkaz, Ťan-Šan, Centrální

Asie I (západ), Centrální Asie II (východ) a Nový Zéland. U každého výše zmíněného vymezeného regionu je nejprve uvedena jeho obecná charakteristika (např. kapitola 5.1.1) a po ní následuje podrobnější analýza jednotlivých případů GLOFs. Z databáze GLOFs (Veh a kol. 2022) jsou do analýzy zahrnuty všechny GLOFs, kromě těch, ke kterým došlo v souostroví Špicberky. Důvodem, je příliš malé množství dat (3 události), kvůli kterému není možné danou oblast řádně analyzovat.

Obecná charakteristika regionu se zaměřuje zejména na oblasti s vyšším výskytem ledovcových povodní. Popisuje celkové množství zaznamenaných GLOFs a ledovcových jezer v oblasti, a to včetně jejich nadmořských výšek a nejstaršího záznamu o vylití vody z ledovcového jezera. Obecná charakteristika dále obsahuje snímky regionu a četnosti daných událostí v konkrétních lokalitách (Obr. 3–13). Na snímcích je četnost jednotlivých případů GLOFs buď umístěna v kruhovém bodu, kde je jejich množství vyznačeno číslovkou, nebo v případě ojedinělé události je lokalita vyznačena modrým navigačním bodem.

Po obecné charakteristice regionu následuje popis jezerních hrází v okamžiku, kdy došlo k vylití vody z daného ledovcového jezera (viz např. kapitola 5.1.1.1). Definice hrází je provedena pomocí parametrů, **typ hráze přehrazující ledovcové jezero a způsob selhání hráze**.

Data pocházející z parametru, který popisuje **typ hráze**, jsou rozdělena do kategorií *Ledovec*, *Moréna*, *Skalní stupeň*, *Kombinované* a *Neznámé*. Množství jednotlivých případů je vyznačeno v grafu (např. Graf 1) na základě kterého jsou data analyzována. Do kategorie *Ledovec* spadají jezera hrazená ledovcem, kategorie *Moréna* zahrnuje ledovcová jezera, která byla v okamžiku vzniku GLOF hrazena morénou, kategorie *Skalní stupeň* obsahuje ledovcová jezera, která jsou obklopena skalními stěnami, kategorie *Kombinované* zahrnuje jezera, u kterých jsou skalní stupně hradící jezero překryty morénou. Poslední kategorie *Neznámé* zahrnuje případy, kdy nebyl typ hráze v okamžiku vylití vody známý.

Data z druhého parametru, popisujícího **způsob selhání hráze** v okamžiku vzniku GLOF, jsou rozdělena do tříd *Protržení*, *Přelití* a *Neznámé*. Četnosti výsledných dat jsou u každého regionu znázorněny grafem (např. Graf 2). Kategorie *Protržení* zahrnuje případy, kdy došlo v okamžiku GLOF k narušení soudržnosti hráze, může se tak jednat buď o přímou destrukci hráze nebo například o otevření subglaciálního (překrytého ledovcem) tunelu a následný odtok vody pod povrchem ledovce hradící jezero. Kategorie *Přelití* obsahuje soubor dat, kdy došlo k náhlému vylití velkého objemu vody z ledovcového jezera prostřednictvím přelití jeho hráze. Poslední kategorie *Neznámé* opět zahrnuje případy, kdy není způsob selhání hráze v okamžiku vzniku GLOF známý.

Po rozboru jezerních hrází jsou pomocí parametru **datum** v každém regionu analyzovány četnosti GLOFs mezi lety 1900–2022 (viz např. kapitola 5.1.1.2). Starší data nebyla zahrnuta do datasetu z důvodu většího množství chybějících dat, bez kterých nelze

objektivně posoudit vybraný region z hlediska četnosti ledovcových povodní. Pro porovnání množství GLOFs ve vybraných letech byla data vynesena do grafu, kde je jejich počet rozdělen do desetiletých intervalů formou 1900–1909, 1910–1919, ... 2010–2019 (viz např. Graf 3). Jednotlivé GLOFs byly do zmíněných intervalů přiřazeny pouze tehdy, bylo-li zcela jednoznačné, ve kterém desetiletí se událost odehrála. Výsledná data za roky 2020–2022 jsou sice v práci zmíněna, nicméně je velmi pravděpodobné, že v tomto datasetu bude chybět větší množství událostí typu GLOF, které zatím nebyly do databáze zařazeny. Z tohoto důvodu nejsou roky 2020–2022 zahrnuty v grafu. Graf, porovnávající množství ledovcových povodní ve vybraných letech, dále zahrnuje křivku, která zobrazuje průměrnou teplotu vzduchu ve 2 metrech nad zemí, která byla naměřena stanicí vyskytující se v analyzovaném regionu (NASA 2019). Hodnoty křivky byly vypočítány jako průměr naměřených teplot za jednotlivé roky ve sledovaném období (1900–2019), přičemž každý průměr byl rozdělen do stejných desetiletých intervalů, do kterých je rozdělena četnost GLOFs. Pomocí zmíněného grafu je tak možné porovnat četnosti ledovcových povodní v dané oblasti s teplotou vzduchu ve 2 metrech nad zemí v určitém časovém období.

Kromě podrobnějšího rozboru GLOFs, odehrávající se mezi lety 1900–2022, jsou ledovcové povodně pomocí parametru **datum** analyzovány podle jednotlivých měsíců, ve kterých k událostem došlo (viz např. kapitola 5.1.1.3). Množství vzniklých GLOFs za měsíce leden–prosinec zobrazuje graf, pomocí kterého je v kapitole výskyt těchto událostí následně popisován (viz např. Graf 4). Graf zahrnuje všechny ledovcové povodně za celé sledované období, u kterých byl jednoznačně známý měsíc, ve kterém daná událost nastala. Součástí takové analýzy je i *klimadiagram*, který představuje průměrné hodnoty naměřeného úhrnu srážek a denní maximální a minimální teploty pro jednotlivé měsíce mezi lety 1985–2022 (viz např. Graf 5). Klimadiagram je v každé sledované oblasti vynesena pro takovou lokalitu, která splňuje dvě podmínky: za prvé se musí v okolí lokality nacházet větší množství zaznamenaných GLOFs a za druhé se musí lokalita vyskytovat v takovém intervalu nadmořské výšky, ve které je četnost ledovcových povodní nejvyšší. Pomocí zmíněného klimadiagramu a grafu znázorňujícího četnost GLOFs lze porovnat závislost ledovcových povodní na úhrnu srážek a teplotách pro jednotlivé měsíce.

Posledním parametrem, který byl z databáze GLOFs (Veh a kol. 2022) pro analýzu použit jsou **zeměpisné souřadnice** určující polohu jezera, které způsobilo ledovcovou povodeň. Díky tomuto parametru bylo možné zjistit množství GLOFs pocházejících z jednoho jezera za celé sledované období (viz např. Kapitola 5.1.1.4). Pomocí výsledných dat byla následně vytvořena tabulka zobrazující tyto četnosti utříděné do intervalů: 1 událost, 2–10 událostí a více než 10 událostí, společně s informací popisující typ jezerní hráze v okamžiku, kdy u jezera naposledy došlo k povodni typu GLOF (viz např. Tab. 1).



Analýza GLOFs má za cíl prostřednictvím dostupných dat z databáze GLOFs (Veh a kol. 2022) a webové aplikace Google Earth (Google 2022) co nejpřesněji definovat, chování ledovcových jezer v konkrétních lokalitách, a to jak v závislosti na místním klimatu, tak na jiných zjištěných potenciálních příčinách. Většina dat o příčině GLOF nejsou dostupná, proto nemohly být do této analýzy zahrnuty. Nedostupnost takových informací v databázi může být vysvětlena tím, že existuje mnoho spouštěcích mechanismů, které lze často zjistit pouze přímým pozorováním jezera v okamžiku vzniku ledovcové povodně (Singh a kol. 2011). Nicméně i přes tato omezení se ke každé oblasti nachází dostatečné množství dat, kvůli kterým lze v regionu prostřednictvím analýz definovat chování ledovcových jezer s vyšší přesností.

## 4.2 Vzájemné porovnání regionů

Pomocí zpracovaných dat, popisujících analyzované regiony v Kapitole 5, jsou v následující Kapitole 6 jednotlivé oblasti vzájemně porovnávány. Pro co nejlepší porovnání byly vytvořeny výstupy prostřednictvím tabulkového softwaru Excel, které jsou v kapitole následně popisovány.

V rámci vzájemného porovnání zobrazuje Tabulka 11 u každého ze sledovaných regionů jak celkovou četnost zaznamenaných ledovcových jezer, u kterých došlo k události typu GLOF, tak celkovou četnost GLOFs včetně data nejstarší zaznamenané ledovcové povodně. V Tabulce 12 je ke každému ze sledovaných regionů zobrazena jeho zeměpisná šířka a zastoupení jednotlivých typů ledovcových jezer. Regiony jsou v tabulce seřazeny na základě zeměpisné šířky, která byla u každé oblasti určena s přesností  $\pm 1^\circ$  a byla vymezena podle nejsevernějšího a nejjižnějšího ledovcového jezera, u kterého v oblasti došlo k události typu GLOF. Zastoupení jednotlivých typů ledovcových jezer je v tabulce rozděleno na ledovcem hrazená a ledovcem nehrazená jezera. Ledovcem nehrazená jezera zahrnují jezera hrazená morénou, jezera za skalním stupněm a jezera s kombinovanou hrází. Jezera, kde byl typ hráze v okamžiku vylití vody neznámý, nejsou v tabulce zahrnuta.

Graf 51 porovnává typy jezerních hrází a způsoby jejich selhání. V levé části grafu je pro každou analyzovanou oblast procentuálně vyjádřena četnost typů hrází, které v okamžiku vzniku GLOF selhaly. V pravé části grafu je procentuálně vyjádřena četnost případů, kdy nastalo v okamžiku vzniku GLOF protržení či přelití jezerní hráze. Graf nezahrnuje případy, kdy byl typ hráze, popřípadě způsob jeho selhání, neznámý.

Tabulka 13 porovnává změny v četnosti GLOFs za pozorované období 1900–2019. Tabulka zároveň zahrnuje jak míru oteplení v regionu, tak údaje o závislosti teploty vzduchu, naměřené v dané oblasti (NASA 2019), na globální teplotě vzduchu (EPI 2015; NOAA 2023). Parametr **Tendence v množství GLOFs** zobrazuje, zda u regionů dochází v čase k rostoucí (vyznačeno znaménkem +) či klesající (vyznačeno znaménkem –) tendenci zaznamenaných

případů GLOFs. V případě nerovnoměrného výskytu je množství GLOFs vyznačeno znaménkem +/- . Parametr **Počátek měření** zobrazuje rok, od kterého jsou u každé analyzované oblasti v kapitole 5 používána souvislá data o teplotě vzduchu ve 2 metrech nad zemí. U nadpoloviční většiny analyzovaných regionů jsou tato data zaznamenávána již od roku 1900. Nejméně dostupná souvislá data o teplotě vzduchu jsou v regionu *Střední Andy*, kde jsou stanicí zaznamenávána až od roku 1950. Parametr **Oteplení [°C]** zobrazuje rozdíl v průměrné teplotě vzduchu, naměřené stanicemi v analyzovaných oblastech, za určité časové období. Hodnota je vyjádřena rozdílem mezi zprůměrovanou teplotou vzduchu za desetiletí, kdy došlo k počátku měření a zprůměrovanou teplotou vzduchu za roky 2010–2019. Pro hodnoty uvedené v parametru **Korelační koeficient** byl použit Pearsonův korelační koeficient znázorňující vztah mezi změnou teploty vzduchu naměřené na stanici a změnou globální teploty vzduchu.

Tabulka 14 porovnává závislost výskytu GLOFs na teplotě a na srážkách. Data o teplotě vzduchu a úhrnu srážek jsou za jednotlivé měsíce pro každou oblast použita z klimadiagramů (Meteoblue 2023) zobrazovaných v Kapitole 5. Hodnota u parametru **Korelační koeficient teploty vzduchu** udává pomocí Pearsonova korelačního koeficientu vztah mezi četností GLOFs a průměrnou maximální teplotou vzduchu za jednotlivé měsíce v roce. Hodnota u parametru **Korelační koeficient srážek** udává pomocí Pearsonova korelačního koeficientu vztah mezi četností GLOFs a úhrnem srážek za jednotlivé měsíce v roce. Parametr **Roční rozpětí teploty vzduchu [°C]** zobrazuje maximální a minimální průměrné měsíční teplotní maximum. Na základě hodnot uvedených u tohoto parametru je možné zjistit, zda se ve výšce, kde převážně dochází ke GLOFs, objevují v průběhu roku pouze sněhové srážky či také dešťové. **Roční amplituda teploty vzduchu** udává rozpětí průměrné maximální teploty vzduchu v průběhu roku.

Graf 52 zobrazuje celkové množství zaznamenaných GLOFs v jednotlivých měsících. Pro souhrnné porovnání regionů na jižní a severní polokouli byly v grafu jednotlivé měsíce vyznačeny formou I–XII. Pro regiony na severní polokouli je pořadí římských číslic I–XII rovno po sobě jdoucím měsícům leden–prosinec. Pro regiony na jižní polokouli je pořadí římských číslic I–XII rovno po sobě jdoucím měsícům červenec–červen. Kromě zobrazeného celkového množství GLOFs jsou do grafu vyneseny dvě křivky znázorňující průměrnou globální teplotu vzduchu ve 2 metrech nad zemí pro roky 1900 a 2019 (NASA 2023).

Graf 53 porovnává četnost opakování GLOFs u jednotlivých typů ledovcových jezer. V grafu jsou zobrazována data jak o celkovém množství jednotlivých typů ledovcových jezer, tak o opakovaných selháních jejich hrází.

## 5 ANALÝZA DATABÁZE GLOFs

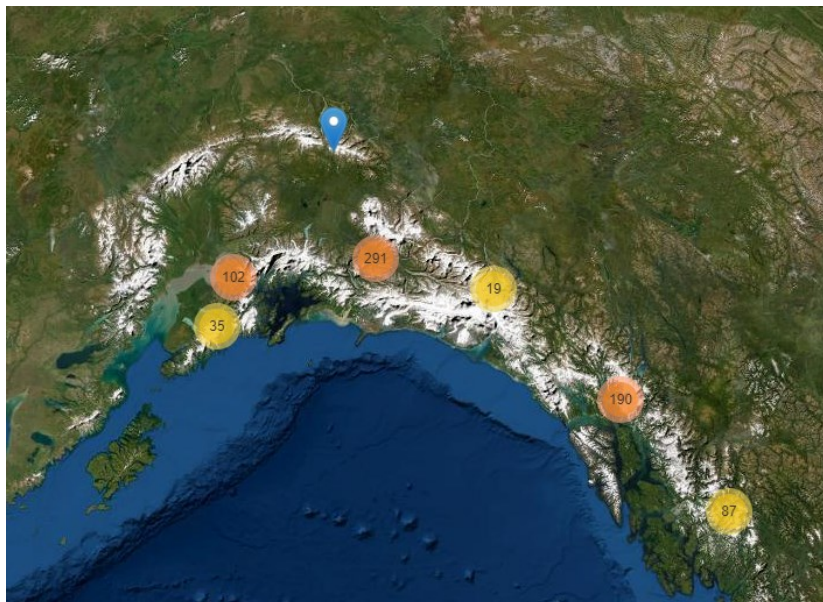
### 5.1 Severní Amerika

#### 5.1.1 Aljaška

Ve zkoumaném regionu Aljaška je věnována pozornost lokalitám, nacházejícím se v severozápadní části Severní Ameriky, u kterých je v rámci analyzované databáze (Veh a kol. 2022) zaznamenáno zvýšené množství povodní které byly způsobeny selháním hrází ledovcových jezer. Jedná se o oblasti: *pohoří Kenai mountains*, *pohoří Chugach mountains*, *Wrangellovo pohoří*, *pohoří svatého Eliáše* a *severní část Pobřežních hor*.

Nejstarší známý GLOF v tomto regionu nastal roku 1810 v *pohoří svatého Eliáše*. Od té doby bylo do současnosti v databázi zdokumentováno celkem 725 takových případů (viz Obr. 3). Dohromady je zaznamenáno 55 jezer, u kterých došlo k selhání hráze, přičemž k největšímu množství případů dochází v *severní části Pobřežních hor*, kde je v rámci regionu největší výskyt ledovcových jezer (Rick a kol. 2022), a ve *Wrangellově pohoří*. Jezera, u kterých došlo ke GLOF se v regionu vyskytují nejen s ledovcovou hrází, jejichž přítomnost spadá do výšek 15–2801 m n. m., ale také s morénovou hrází, které se vyskytují ve výškách mezi 91–1529 m n. m. Z celkových 55 jezer se 50 z nich nachází převážně ve výškách 15–1200 m n. m.

Obr. 3: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Aljaška (Veh a kol. 2022)



##### 5.1.1.1 Jezerní hráze

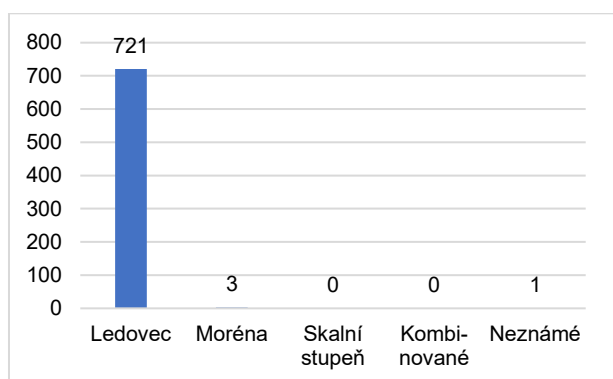
V regionu Aljaška byly analyzovány jezerní hráze v okamžiku jejich selhání (viz Grafy 1, 2). Graf 1 zobrazuje způsob přehrazení jezera v momentě, kdy se z něj vylila voda, která způsobila záplavu typu GLOF. Z výsledků vyplývá, že ledovcová jezera, u kterých došlo ke

GLOF byla v okamžiku záplav hrazena z převážné většiny ledovcem. Pouze u necelého 1 % případů byl způsob hrazení jezera neznámý nebo bylo jezero hrazeno morénou. Zatímco ke GLOFs dochází zejména u ledovcem hrazených jezer, podle Rick a kol. (2022) v regionu Aljaška převažují jezera hrazená morénou a skalním podložím, jejichž množství postupně narůstá, a pouze přibližně třetina jezer je hrazená ledem, jejichž množství naopak postupně klesá.

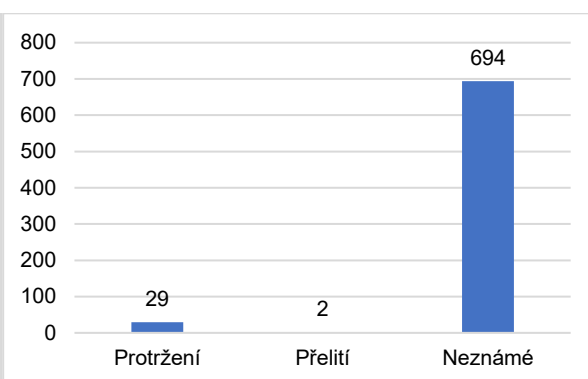
Na základě výsledků z rozboru databáze je zřejmé, že v rámci oblasti je velký nedostatek informací ohledně příčiny selhání hráze (viz Graf 2). Z celkových 725 zaregistrovaných případů GLOFs je u pouze 31 případů zaznamenán typ poškození hráze. Nicméně i z poměrně malého množství získaných dat lze vyzorovat, že zde došlo k téměř patnáctinásobně častějšímu případu protržení hráze oproti situacím, kdy byla hráz pouze přelita. Tato data naznačují, že je velmi pravděpodobné, že jsou ledovcové hráze ve sledované oblasti náchylné spíše k jejich protržení.

U 27 z 29 zmíněných případů protržení hráze došlo většinou erozní činností k otevření subglaciálního kanálu a částečnému či úplnému odvedení vody z jezera pod ledovcovou hrází. Zbylé dva zaregistrované případy protržení hráze patří morénovým hrázím, u kterých je konkrétnější průběh jejich poškození neznámý.

Graf 1: Způsob přehrazení jezera v regionu Aljaška  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 2: Způsob selhání hráze v regionu Aljaška  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



### 5.1.1.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky

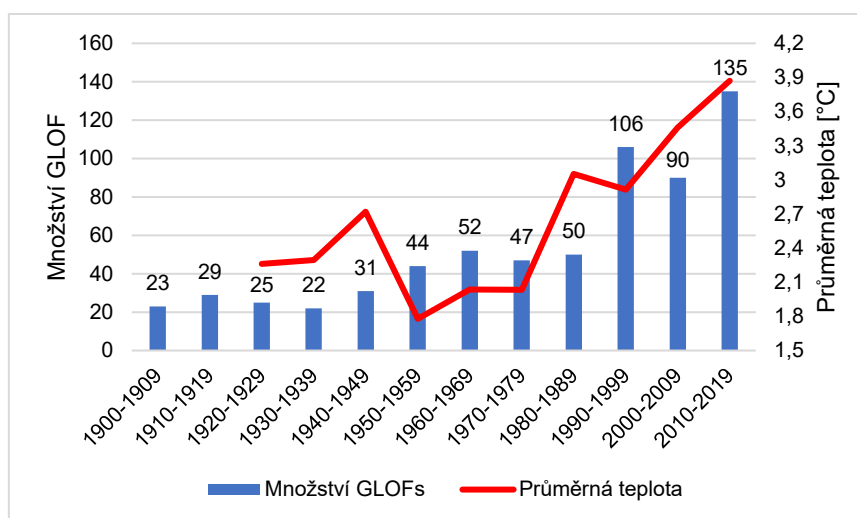
Graf 3 zobrazuje jak počet ledovcových záplav uváděný za jednotlivá desetiletí mezi lety 1900–2019, tak jeho závislost na vývoji průměrné teploty naměřené na stanici *Anchorage Intl Ap* v nadmořské výšce 36 metrů (Meteoblue 2023). Z grafu vyplývá že v první polovině 20. století byla intenzita zaznamenaných GLOFs minimální, čemuž pravděpodobně přispívá horší dostupnost dat. Od počátku padesátých let však začalo docházet k mírnému navýšení výskytu těchto záplav až do roku 1989, kdy nastal zlom a množství případů se za jedno desetiletí zdvojnásobilo. Kromě výrazného navýšení četnosti ledovcových záplav docházelo podle Rick a kol. (2022) v letech 1984–1988 a 1997–2001 k největšímu nárůstu

objemu a množství jezer hrazených morénou, což je vyvoláno urychlujícím ústupem místních ledovců.

Zhruba pětkrát více případů oproti první polovině 20. století bylo zpozorováno mezi lety 2010–2019, což je nejvíce za celé sledované období. Od roku 2013–2014 je navíc zaznamenána zvýšená míra ústupu ledovců, která může vést k ještě častějším záplavám pocházejícím z ledovcových jezer (Jakob a kol. 2021). Od roku 2020 bylo do současnosti zpozorováno 25 událostí typu GLOF. Pokud by docházelo k podobné četnosti záplav i nadále, došlo by mezi lety 2020–2029 zhruba ke 130 případům.

Neustálé zesilování skleníkového efektu lidskou činností způsobuje nejen zvyšování průměrné globální teploty, ale také mění rozložení ročního úhrnu srážek. Rostoucí strmost křivky vykazující průměrnou teplotu v Grafu 3 poukazuje, že ke změnám průměrné globální teploty dochází v průběhu času rychleji, přičemž mnohé důkazy naznačují, že každou dekádu může docházet k nárůstu globální teploty o 0.2 °C (Nema a kol. 2012). Zvyšování atmosférické teploty způsobuje rychlejší tání sněhu a ledu (Church a kol. 2007), což v regionu Aljaška pravděpodobně povede stále k častějším záplavám typu GLOF.

Graf 3: Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Aljaška  
vlastní zpracování (NASA 2019; Veh a kol. 2022)



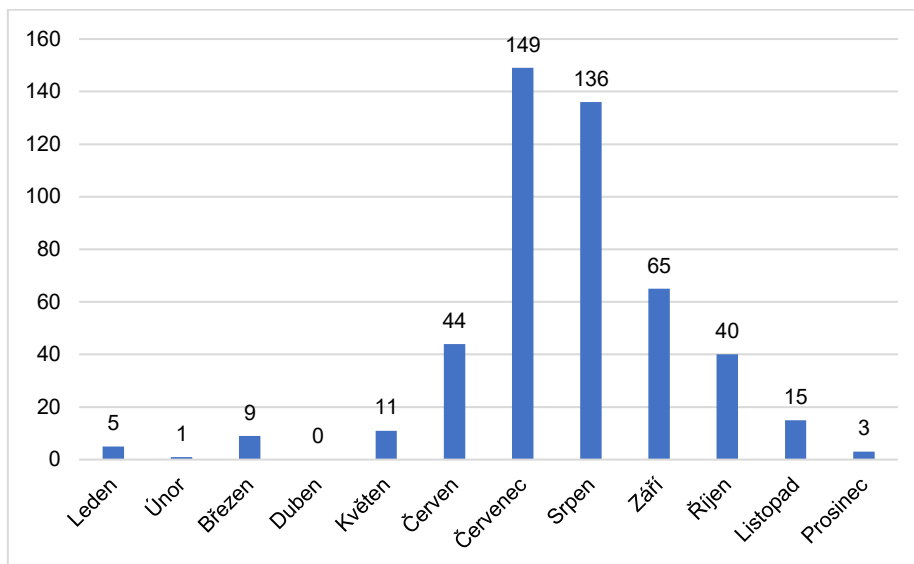
### 5.1.1.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce

Na Grafu 4 popisující počet případů GLOFs za jednotlivé měsíce, od počátku pozorování do současnosti, je viditelný výrazný nárůst ledovcových záplav v průběhu letního období, zejména pak v měsících červenec a srpen. Během podzimu dochází opět k mírnému poklesu, nicméně množství GLOFs je stále vysoké. K nejmenšímu množství záplav dochází v zimě a na jaře.

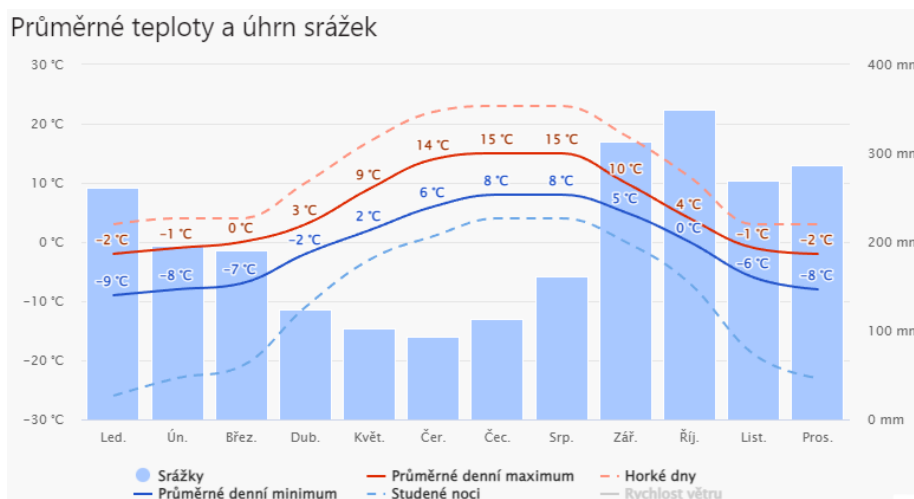
Graf 5 značí průměrnou měsíční teplotu a průměrný úhrn srážek v *severní části Pobřežních hor* v nadmořské výšce 826 metrů. V uvedené oblasti dochází ke zvýšenému úhrnu srážek v podzimním a zimním období, což je následně doprovázeno zvýšeným táním

zejména v průběhu letního období, kdy je průměrná denní teplota nejvyšší. U křivky zobrazující průměrnou teplotu za jednotlivé měsíce lze opět zpozorovat, stejně jako u Grafu 3, její vysokou korelaci s množstvím zaznamenaných GLOFs v jednotlivých měsících.

Graf 4: Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Aljaška  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 5: Klimadiagram severní části Pobřežních hor ve výšce 826 m n. m. (Meteoblue 2023)



### 5.1.1.4 Četnost opakování GLOFs

Tabulka 1 zobrazuje četnost opakování záplav z 55 ledovcových jezer se specifickým typem hráze, určeným podle jejího posledního zaznamenaného selhání, které zapříčinilo povodeň typu GLOF. V regionu Aljaška se vyskytlo pouze jedno jezero, u kterého byl typ přehrazení jezera v okamžiku posledního vylití vody neznámý, přičemž u všech předchozích případů bylo jezero hrazeno ledovcem. U ostatních jezer k žádné změně typu hráze během celého období pozorování nedošlo.

Podle hodnot v tabulce je zřejmé, že k nejčastějšímu opakování záplav z jednoho ledovcového jezera dochází u ledovcem hrazených jezer. Ledovcem hrazená jezera procházejí několika cykly napouštění a vypouštění se schopností zapříčinit větší množství GLOFs (Jacquet a kol. 2017), zatímco jezera hrazená morénou mají tendenci způsobit GLOF pouze jednou, protože jejich hráz se v tomto procesu obvykle natrvalo poruší (Rick a kol. 2022).

U všech 3 morénou hrazených jezer došlo k vylití vody pouze jednou, přičemž u 2 ze 3 těchto jezer bylo zaznamenáno protržení hráze (viz Graf 2). Hráz tak byla po jejím narušení buď nenávratně poškozená nebo zde dosud nedošlo k žádné další potenciální příčině, která by mohla způsobit další ledovcovou záplavu.

Ve sledovaném regionu se vyskytují 4 ledovcem hrazená jezera, u kterých došlo k opakovanému selhání hráze od počátku pozorování do současnosti více než 40krát. Jezero, u kterého nastává v regionu Aljaška k nejčastějším případům GLOF nese název Hidden Creek Lake. Ledovcová hráz tohoto jezera byla mezi prvním zaznamenaným případem v roce 1860 doposud narušena celkem 149krát, což značí, že k jejímu protržení dochází téměř každý rok.

Četné GLOFs vznikající u Hidden Creek Lake jsou vždy zapříčiněny odtokem vody jednou z mnoha subglaciálních trhlin vedoucích pod ledovcovou hrází, pod kterou se současně nachází 20 % celkového objemu jezera (Anderson a kol. 2003). Whalley (1971) a Anderson a kol. (2003) se domnívají, že k vylití vody z jezera dojde pouze pokud je v jezeře dostatek vody schopné navýšit hydrostatický tlak natolik, aby došlo k otevření subglaciálního kanálu vedoucího bazálním drenážním systémem ledovce.

Tab. 1: Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Aljaška  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Typ přehrazení jezera	1	2–10	> 10
Ledovec	10	24	17
Moréna	3	0	0
Skalní stupeň	0	0	0
Kombinované	0	0	0
Neznámé	0	1	0
Celkem	13	25	17

### 5.1.1.5 Shrnutí

Ve vymezeném regionu Aljaška dochází ke GLOFs především u ledovcem hrazených jezer, u kterých zároveň dochází k nejčastějšímu množství opakovaného narušování jejich hrází. Dále u ledovcem i morénou hrazených jezer dochází k záplavám způsobeným nejčastěji protržením hráze, nicméně způsoby selhání hrází zůstávají u velkého počtu jezer neznámé.

Intenzita ledovcových záplav je od devadesátých let nejvyšší za celé analyzované období. Kromě rostoucích případů GLOFs roste i počet ledovcových jezer společně s jejich celkovou plochou (Rick a kol. 2022). Na základě vysoké korelace s narůstající průměrnou teplotou lze předpokládat, že se bude množství záplav po určitou dobu stále navyšovat.

Díky oteplování dochází k tání a ústupům místních ledovců (Zemp a kol. 2019), což přispívá ke změně nejen krajiny, ale i typu ledovcových hrází. Protože ledovce ustupují do vyššího a strmějšího terénu, je předpokládána změna proglaciálních jezer na jezera hrazená skalním podložím (Furian a kol. 2021). V rámci jednoho roku dochází k záplavám nejčastěji v červenci, srpnu a září, což je pravděpodobně podpořeno velkou mírou tání v letních měsících.

### 5.1.2 Západní Kanada a USA

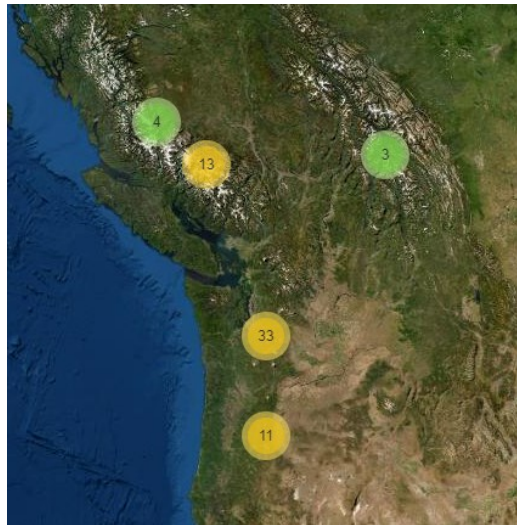
Region Západní Kanada a USA zahrnuje několik lokalit, u kterých byly v rámci databáze (Veh a kol. 2022) zdokumentovány záplavy pocházející z ledovcových jezer (viz Obr. 4). Jedná se o lokality *jižní část Pobřežních hor*, *severní část Skalnatých hor*, *Kaskádové pohoří* a *pohoří Sierra Nevada*.

První zaznamenaná ledovcová povodeň proběhla ve sledované oblasti roku 1926 v *Kaskádovém pohoří*. V regionu bylo zaregistrováno 64 povodní typu GLOF pocházejících z celkem 30 různých jezer. K největšímu množství takových událostí dochází v *Kaskádovém pohoří* a v *jižní části Pobřežních hor*.

V rámci ledovcových jezer, u kterých došlo ke GLOF se zde nachází ledovcem hrazená jezera ve výškách 1375–2846 m n. m. a morénou hrazená jezera ve výškách 813–3474 m n. m. Téměř všechna ledovcová jezera, která zapříčinila ledovcovou povodeň, se nachází ve výškách 1300–2400 m n. m.



Obr. 4: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Západní Kanada a USA (Veh a kol. 2022)



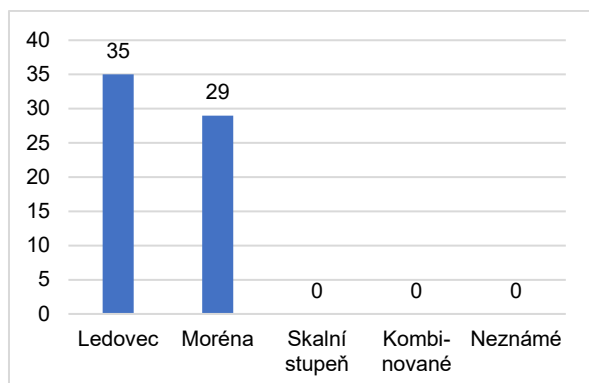
### 5.1.2.1 Jezerní hráze

Dle Grafu 6 bylo ve sledované oblasti množství GLOFs pocházejících z jezer hrazených ledovcem a jezer hrazených morénou přibližně stejné. K největšímu množství záplav pocházejících z jezer hrazených ledovcem, dochází v *Kaskádovém pohoří*, kde se jezera způsobující GLOF nachází zejména na sopečných vrcholech, kde bývají zakryta ledovcem. Jedná se například o jezera na Mount Rainier. Záplavy z jezer hrazených morénou dominují v lokalitách: *jižní část Pobřežních hor, severní část Skalnatých hor a Sierra Nevada*.

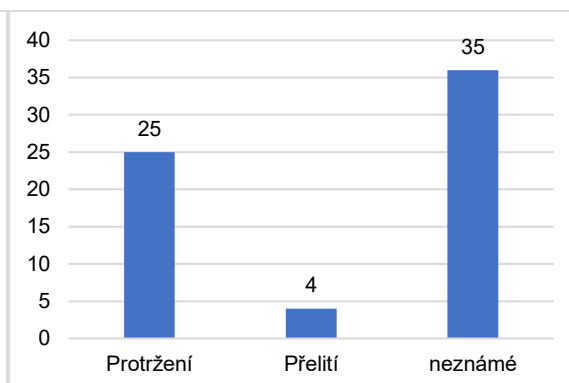
Způsob selhání hráze ledovcových jezer je znám u téměř poloviny případů GLOFs (viz Graf 7). Ve sledované oblasti došlo nejčastěji k protržení hráze, které ve všech případech nastalo u englaciálních (nacházejících se uvnitř ledovce) či subglaciálních (překryté ledovcem) jezer. Ze čtyř známých případů, u kterých nastalo přelití vody přes hráz, došlo ke třem z nich u morénou hrazených jezer a pouze k jednomu u jezera hrazeného ledovcem.

Na základě výsledných hodnot uvedených v Grafech 6 a 7 lze obecně předpokládat, že ve sledované oblasti dochází k vylití vody pouze u jezer překrytých ledovcem nebo nacházejících se v ledovci či u jezer hrazených morénou. Z celkových dvaceti devíti případů GLOFs pocházejících z jezer hrazených morénou byl pouze u třech z nich zjištěn způsob selhání hráze, z tohoto důvodu nelze obecně určit, zda v této oblasti dochází spíše k protrhávání morénových hrází nebo pouze k jejich přelití.

Graf 6: Způsob přehrazení jezera v regionu  
Západní Kanada a USA  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 7: Způsob selhání hráze v regionu  
Západní Kanada a USA  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



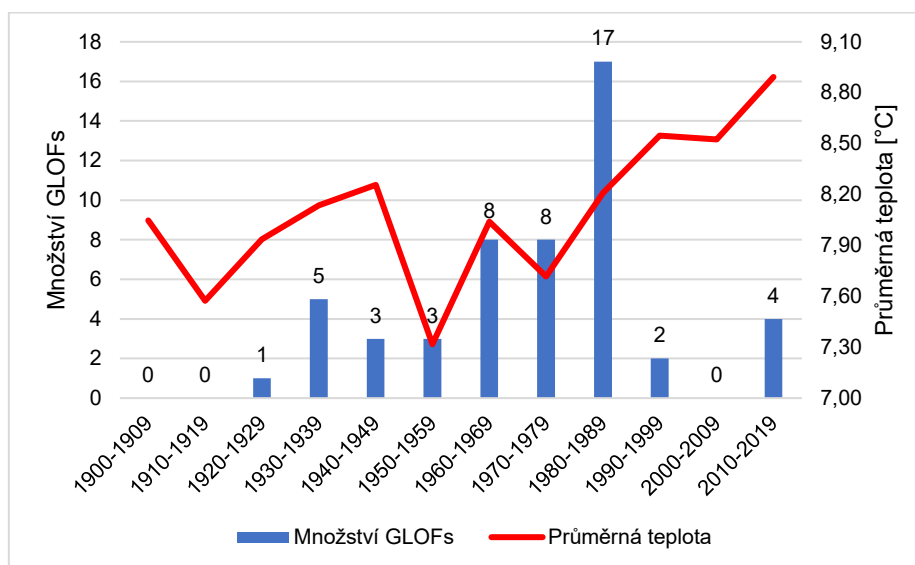
### 5.1.2.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky

V Grafu 8 je porovnávána četnost GLOFs s průměrnou teplotou naměřenou na stanici *Northport* v nadmořské výšce 450 metrů (Meteoblue 2023). Nejvyšší četnost záplav za jednotlivé roky vykazuje region Západní Kanada a USA v letech 1960–1989, přičemž k maximálnímu množství případů došlo v letech 1980–1989. Od počátku 90. let až do současnosti dochází opět k razantnímu poklesu případů ledovcových záplav, jejichž množství je podobné jako v letech 1920–1959.

Nárůst případů GLOFs do počátku 90. let je nejspíše zapříčiněn zvyšující se mírou tání ledu a sněhu, která je způsobená postupným nárůstem průměrné teploty (Church a kol. 2007). Na následném poklesu případů GLOFs od 90. let se mohl podílet postupný ústup až zánik ledovců (Zoback a Grollimund 2001), které významně zásobují ledovcová jezera roztátým ledem a sněhem (Singh a kol. 2011). Nicméně razantní úbytek událostí typu GLOF od 90. let napovídá, že se může na jejich poklesu v mnohem větší míře podílet rozsáhlé zpevnování hrází člověkem. Díky pevnějším hrázím by tak u potenciálně nebezpečných jezer nedocházelo k vylití vody.

Během let 2020–2022 došlo pouze k jednomu zaznamenanému případu záplavy pocházející z ledovcového jezera, který proběhl v listopadu roku 2020. Prozatím ojedinělý případ tak potvrzuje fakt, že v čase k nárůstu GLOFs v tomto regionu skutečně nedochází.

Graf 8: Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Západní Kanada a USA  
vlastní zpracování (NASA 2019; Veh a kol. 2022)

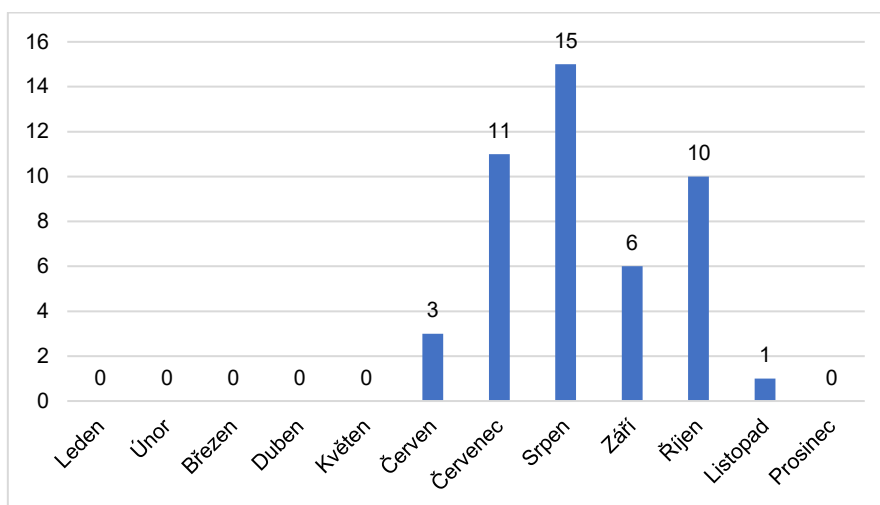


### 5.1.2.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce

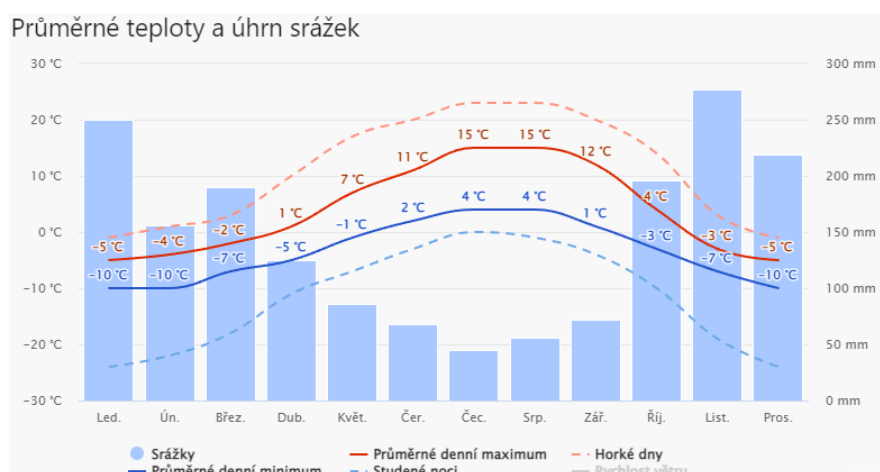
V rámci jednotlivých měsíců, došlo ve sledovaném regionu k případům GLOFs převážně v měsících červen–říjen (viz Graf 9), přičemž nejvíce takových událostí se odehrálo v srpnu. Za celé období pozorování byla naopak zaznamenána pouze jedna ledovcová povodeň v měsících listopad–květen.

Na základě klimadiagramu, který byl vybrán pro oblast jižní části Pobřežních hor v nadmořské výšce 1896 m (viz Graf 10), lze pozorovat vysokou četnost výskytu GLOFs zejména v měsících s nejvyššími denními teplotami. V měsících říjen–březen dochází v rámci roku k vyššímu úhrnu srážek a hromadění nového sněhu. Převážně v letních měsících dochází k vyšší míře tání a jezera se tak začínají rychle naplňovat vodou. Postupným naplňováním vodou, se jezera stanou náchylnějšími na případné protržení či přelití hráze (Jain a kol. 2012), čímž lze vysvětlit vysokou četnost případů GLOFs v měsících červen–říjen.

Graf 9: Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Západní Kanada a USA  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 10: Klimadiagram jižní části Pobřežních hor ve výšce 1896 m n. m. (Meteoblue 2023)



### 5.1.2.4 Četnost opakování GLOFs

Tabulka 2 zahrnuje všech 30 zdokumentovaných ledovcových jezer ve sledovaném regionu společně s četnostmi ledovcových záplav, ke kterým u daných jezer došlo. Za celou dobu pozorování nedošlo u žádného ze zmíněných jezer ke změně typu jejich hráze. Z výsledků vyplývá, že 25 jezer, u kterých došlo k ledovcové záplavě byly hrazené morénou a povětšinou u nich za celé sledované období nastal GLOF pouze jednou. Naopak mezi potenciálně nebezpečnější se jeví jezera hrazená ledovcem, kterých bylo zaznamenáno jen velmi málo, nicméně každé z nich opakovaně způsobilo velké množství záplav.

Ledovcové jezero, které v této oblasti počtem ledovcových záplav dominuje, je bezejmenné podledovcové jezero nacházející se na jihozápadním svahu aktivního vulkánu Mount Rainier v *Kaskádovém pohoří*. Během sledovaného období došlo z tohoto jezera k vylití vody celkem 17krát, přičemž k prvnímu zaznamenanému GLOF došlo v roce 1967

a k poslednímu v roce 2019. Podle Driedger a Fountain (1989) je u tohoto jezera vysoká četnost GLOFs způsobena lokalizací ledovce překrývající jezero. Ledovec se nachází na stupňovitém skalním podloží, u kterého je tak náchylnější na vznik a rozvoj subglaciálních trhlin. Právě uvolnění povodňové vody může být podmíněno jejich případným vznikem či změnami jejich velikostí. Driedger a Fountain (1989) zároveň uvádějí, že k ledovcovým povodním přispívá existence jezera na jihozápadním svahu, kde je více vystaveno extrémním srážkám a vyšší intenzitě slunečního záření, což u jezera zvyšuje míru zásobování vodou.

Tab. 2: Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Západní Kanada a USA  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Typ přehrazení jezera	1	2–10	> 10
Ledovec	0	4	1
Moréna	21	4	0
Skalní stupeň	0	0	0
Kombinované	0	0	0
Neznámé	0	0	0
Celkem	21	8	1

### 5.1.2.5 Shrnutí

Morénou hrazených jezer, které zapříčinily ledovcovou povodeň, je ve vymezeném regionu nejvíce. Nejčastěji došlo z těchto jezer za celé sledované období k vylití vody pouze jednou, přičemž průběh selhání hráze je u většiny z nich neznámý.

Nejvíce ledovcových povodní pocházelo ve sledované oblasti z jezer hrazených ledovcem. U každého takového jezera došlo k selhání hráze více než jednou, přičemž nejčastěji vznikl GLOF protržením hráze.

K ledovcovým záplavám zde dochází nejčastěji v letním a podzimním období, kdy nejvíce záplav nastalo za celé sledované období v 80. letech. Od 90. let zůstává výskyt GLOFs až do současnosti relativně nízký.

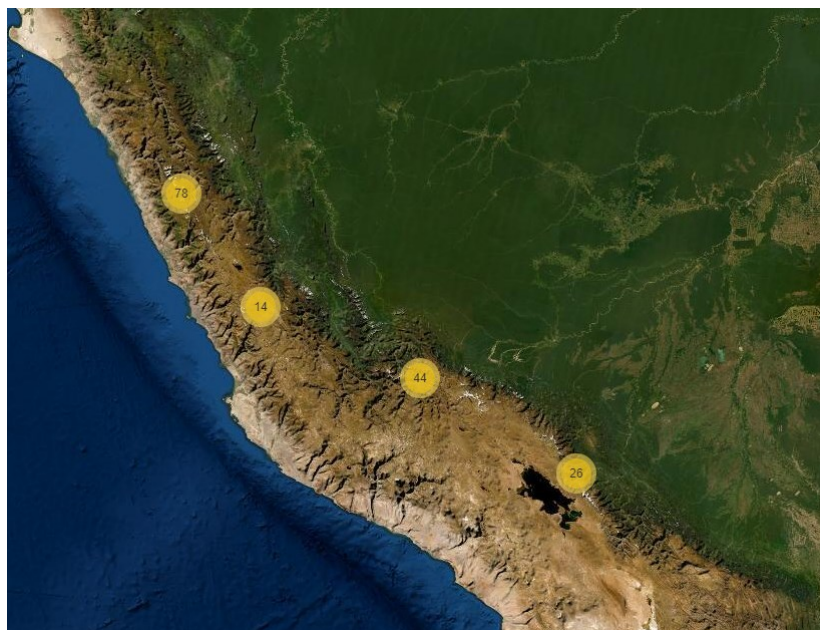
## 5.2 Jižní Amerika

### 5.2.1 Střední Andy

V této kapitole jsou v rámci analyzované databáze (Veh a kol. 2022) zkoumána ledovcová jezera, u kterých došlo k události typu GLOF v pohoří Andy na území států Peru a Bolívie (viz Obr. 5). K nejstarší zaznamenané události došlo u jezera Rajururi hrazeného morénou v pohoří *Cordillera Blanca* v roce 1725, přičemž do dnešního dne bylo v regionu Střední Andy zpozorováno celkem 162 GLOFs pocházejících ze 153 jezer. K největšímu množství zaznamenaných povodní typu GLOF došlo v pohoří *Cordillera Blanca*.

Z jezer, která zapříčinila ledovcovou povodeň, se ve vymezeném regionu vyskytují dvě jezera hrazená ledovcem ve výškách 4863 a 5131 m n. m., dále morénou hrazená jezera ve výškách 3993–5034 m n. m., jezera za skalním stupněm ve výškách 4349–5203 m n. m. a jezera s kombinovanou hrází ve výškách 4323–5298 m n. m. Nadpoloviční většina analyzovaných jezer se nachází ve výškách 4400–4800 m n. m.

Obr. 5: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Střední Andy (Veh a kol. 2022)



### 5.2.1.1 Jezerní hráze

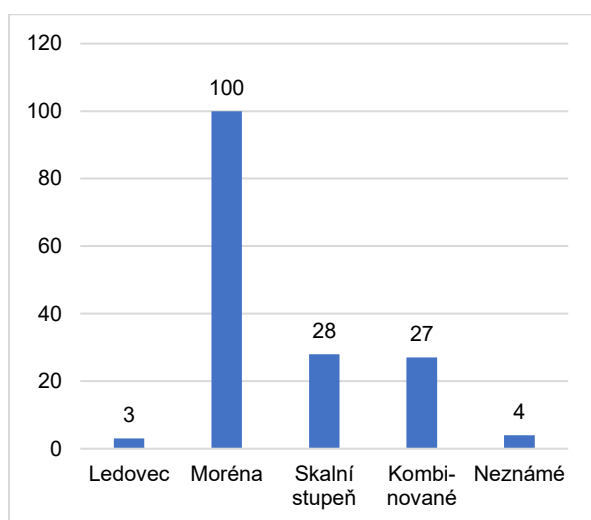
Grafy 11 a 12 blíže charakterizují hráze ledovcových jezer ve Středních Andách v okamžiku, kdy došlo k jejich selhání. Výsledky ztvárněné Grafem 11 ukazují, že zde dominuje výskyt GLOFs pocházejících z jezer hrazených morénou. Naopak nejmenší množství ledovcových povodní pochází z jezer hrazených ledovcem. Dále zde došlo ke GLOFs jak z ledovcových jezer, která se nachází za skalním stupněm, tak v podobném množství z jezer s kombinovanou hrází, u kterých jsou skalní stupně hradící jezero překryty morénou. Pouze 4 případy v rámci celého regionu nemají blíže specifikovaný typ hráze.

Ledovce v regionu Střední Andy za poslední desetiletí značně ustupují a v některých případech zcela zanikají (Davila a Loarte 2018), což má mimo jiné za následek vývoj nových ledovcových jezer ve stále vyšších nadmořských výškách (Emmer a kol. 2016). Podle Emmera a kol. (2016) se v pohoří *Cordillera Blanca*, vlivem probíhající změny klimatu, nachází stále méně ledovcem hrazených jezer, jejichž množstevní podíl činil roku 2016 v rámci všech ledovcových jezer 3,5 %. Naopak k postupnému navyšování počtu (k roku 2016) dochází zejména u jezer hrazených morénou (35,3 %) či skalním podložím (31,3 %) a u jezer s kombinovanou hrází (15,9 %).

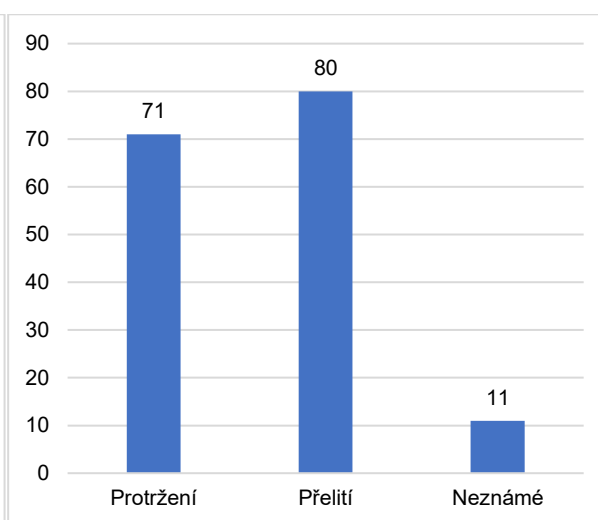
Dle Grafu 12 došlo v regionu k přibližně podobnému množství případů, kdy byla hráz protržena či přelita. Zhruba u dvou třetin případů byla u morénou hrazených jezer hráz protržena, přičemž v jednom zaznamenaném případě vznikl GLOF vylitím vody kanálem nacházejícím se pod morénovou hrází. V rámci jezer hrazených ledovcem došlo u třech zaznamenaných případů GLOFs pouze jednou k protržení ledovcové hráze a dvakrát k otevření subglaciálního tunelu a následnému vylití vody z jezera pod ledovcovou hrází. U jezer za skalním stupněm vznikl GLOF pokaždé následkem přelití hráze. V případě jezer s kombinovanou hrází se vyskytly 4 případy, kdy byla moréna na skalním stupni protržena, v ostatních případech byla hráz přelita.

Typy ledovcových jezer a způsoby selhání jejich hrází v okamžiku vzniku GLOF jsou v tomto regionu pečlivě zdokumentovány. Díky vysoké dostupnosti dat Grafy 11 a 12 velmi přesně vykreslují skutečnost ohledně stavu jezerních hrází a jejich náchylnosti k selhání pro celou oblast And na území států Peru a Bolívie.

Graf 11: Způsob přehrazení jezera v regionu  
Střední Andy  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 12: Způsob selhání hráze v regionu  
Střední Andy  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



### 5.2.1.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky

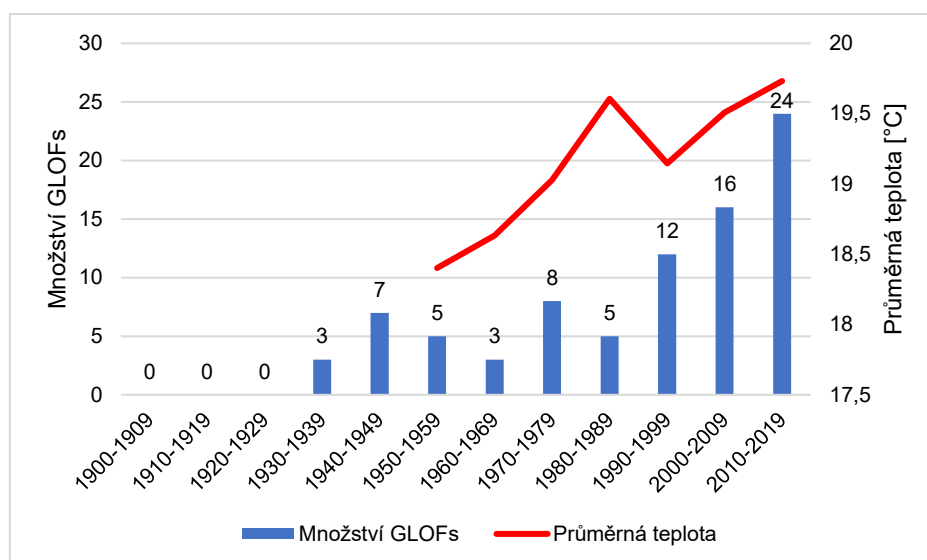
V Grafu 13 je porovnávána četnost GLOFs s průměrnou teplotou naměřenou na stanici *Pisco Intl* v nadmořské výšce 12 metrů (Meteoblue 2023). Zmíněná stanice začala sbírat data o teplotě až od 50. let 20. století. Z toho důvodu nejsou starší data o teplotě v grafu uvedena. Rostoucí četnost ledovcových záplav v regionu Střední Andy mezi lety 1900–2019, je pravděpodobně závislá na nárůstu průměrné teploty (viz Graf 13). K relativně malému počtu povodňů typu GLOF docházelo až do roku 1989, kdy mezi lety 1900–1929 nebyl zaznamenán jediný případ. Od 90. let dochází k vyššímu nárůstu počtu ledovcových záplav, přičemž největší množství případů bylo zaznamenáno mezi lety 2010–2019.



V letech 2020–2022 byl zaznamenán pouze jeden případ GLOF, který nastal 23.02.2020. Vzhledem k současnému trendu nárůstu GLOFs je ovšem nejpravděpodobnější, že od doby posledního zaznamenaného případu nedošlo v dané oblasti k žádnému dalšímu výzkumu zabývajícího se četností ledovcových záplav, ke kterým může i nadále docházet.

GLOFs jsou ve sledované oblasti ovlivněny především dynamickými příčinami, zejména pak svahovými pohyby, které vyvolaly v pohoří *Cordillera Blanca* přibližně 80 % všech známých případů GLOFs (Emmer a kol. 2014). Zmíněné svahové pohyby mohou být v oblasti podmíněny silným zemětřesením (Cluff 1971), degradací permafrostu (Haerberli a kol. 2017), intenzivními srážkami (Ray a Jacobs 2007), zesíleným cyklem El Niño (Vilímek a kol. 2014b) nebo jejich kombinací (Emmer a kol. 2016).

Graf 13: Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Střední Andy  
vlastní zpracování (NASA 2019; Veh a kol. 2022)



### 5.2.1.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce

V oblasti Střední Andy je dle Grafu 14 množství zdokumentovaných případů GLOFs za jednotlivé měsíce v roce relativně vyrovnané. Z dostupných dat ovšem vyplývá, že k největšímu množství záplav došlo v měsících leden a květen a k nejmenšímu v měsících červen–září.

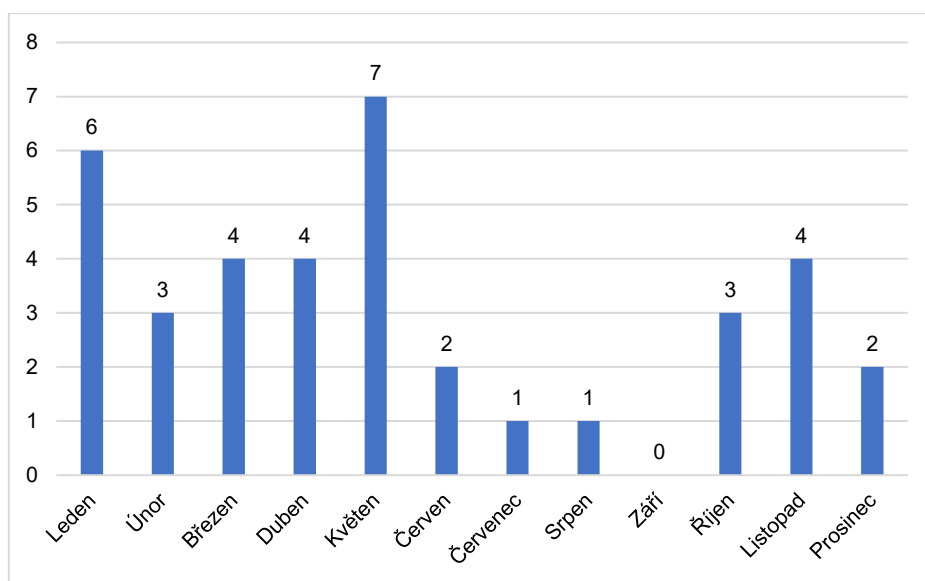
Při pohledu na Graf 15 znázorňující klima v pohoří *Cordillera Blanca* ve výšce 4722 m n. m. je patrné, že se roční amplituda teploty příliš nemění a že průměrné denní teplotní maximum je v každém měsíci větší nebo rovno 8 °C. Denní amplituda teploty je v této oblasti po celý rok výraznější. V průběhu dne se často vyskytují kladné teploty, zatímco během noci záporné. V dané výšce způsobuje opakovaný přechod teplot přes 0 °C mrazové zvětrávání, díky kterému může docházet ke svahovým pohybům (Draebing a Krautblatter 2019).



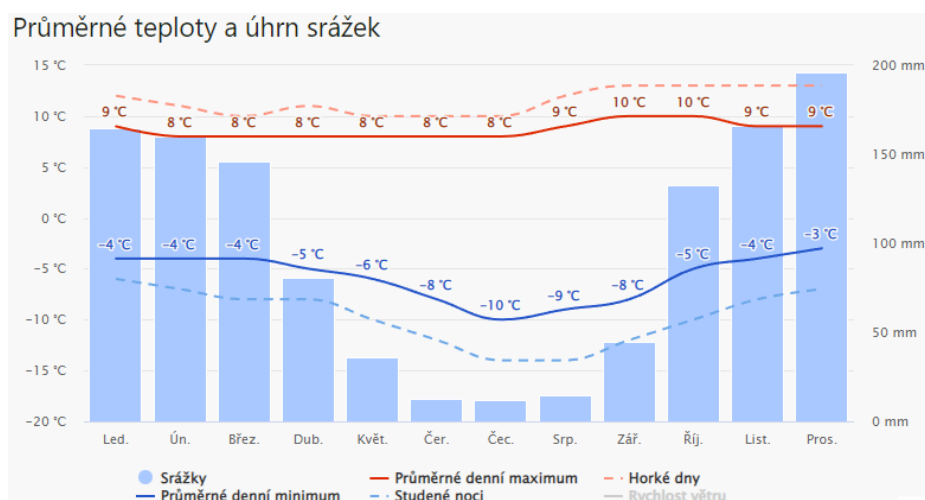
Nejpříhodnější podmínky pro vznik GLOF z hlediska klimatu nastávají v měsících říjen–březen, kdy je denní amplituda teploty podpořena vysokým úhrnem srážek.

Vysoký počet zdokumentovaných GLOFs je za měsíc leden nejpravděpodobněji způsoben kombinací vyššího úhrnu srážek a výrazné denní teplotní amplitudy, díky které může docházet ke svahovým pohybům (Ray a Jacobs 2007; Draebing a Krautblatter 2019). Nejvíce GLOFs bylo zdokumentováno za měsíc květen, kdy bylo 5 zaznamenaných případů podmíněno zemětřesením ze dne 31.05.1970 (Lliboutry a kol. 1977).

Graf 14: Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Střední Andy  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 15: Klimadiagram pohoří Cordillera Blanca ve výšce 4722 m n. m. (Meteoblue 2023)



### 5.2.1.4 Četnost opakování GLOFs

Nejčetněji zdokumentovaná jezera, která zapříčinila záplavu typu GLOF, jsou v analyzovaném regionu hrazena morénou. Naopak nejméně jezer, která způsobila ledovcovou povodeň, je hrazeno ledovcem (viz Tab. 3). Celkově je zaznamenáno 144 jezer, u kterých selhala hráz pouze jednou. Jezer, kde selhala hráz vícekrát, se v oblasti nachází pouze 9. V celém regionu za celou dobu pozorování došlo pouze u jednoho jezera ke změně typu hráze. Jedná se o jezero s kombinovanou hrází, u kterého nastalo během prvního GLOF protržení morény. Během druhé ledovcové povodně bylo jezero hrazeno pouze skalním stupněm.

Region je na základě výsledků specifický tím, že zde dochází k opakovanému vylití vody z jezer pouze výjimečně. Lze to vysvětlit nízkým výskytem ledovcem hrazených jezer, u nichž často dochází k opakovanému selhání hráze (Jacquet a kol. 2017). Oproti tomu u jezer hrazených morénou, které v této oblasti dominují, je obnovení hrází po případném protržení méně časté, takže pouze v některých případech mohou taková jezera opětovně představovat potenciální nebezpečí (Rick a kol. 2022). Jezera za skalním stupněm a jezera s kombinovanou hrází způsobila za celé sledované období povodně z většiny případů pouze jednou. U takových jezer nedochází k poškození skalního stupně přehrazující jezero, a proto se časem tato jezera mohou znovu naplnit vodou, čímž by se opět mohli stát potenciálně nebezpečnými (Emmer a kol. 2016). V regionu se nenachází žádné jezero, u kterého by docházelo k vysokému počtu opakovaných případů GLOFs.

Tab. 3: Četnost opakování GLOFs u jednotlivých jezer v regionu Střední Andy  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Typ přehrazení jezera	1	2–10	> 10
Ledovec	1	1	0
Moréna	88	6	0
Skalní stupeň	26	1	0
Kombinované	25	1	0
Neznámé	4	0	0
Celkem	144	9	0

### 5.2.1.5 Shrnutí

Nejvíce GLOFs mělo původ u jezer hrazených morénou, jejichž množství je ve sledovaném regionu nejvyšší. Naopak minimální množství zpozorovaných povodní nastalo u jezer hrazených ledovcem, kterých je ve Středních Andách nejméně (Emmer a kol. 2016).

Většina případů protržení jezerní hráze nastala u jezer hrazených morénou, zatímco k přelití hráze docházelo zejména u jezer nacházejících se za skalním stupněm a u jezer s kombinovanou hrází. V oblasti většinou dochází k selhání jezerních hrází pouze jednou.

Od 90. let dochází k razantnímu nárůstu povodní typu GLOF. V regionu zároveň dochází k nárůstu teploty, která nejspíše podmiňuje narůstající četnost GLOFs. Stále vyšší teploty a intenzivní srážky vytváří podmínky pro vznik svahových pohybů, které jsou v tomto regionu hlavním podnětem pro vznik GLOF (Emmer a kol. 2014).

Nejvíce GLOFs bylo zaznamenáno v měsících leden a květen. V lednu je vysoký výskyt podmíněn převážně klimatickými podmínkami a v květnu je vysoký počet případů podmíněn zemětřesením, které nastalo roku 1970 (Lliboutry a kol. 1977). Mezi nejnebezpečnější jezera v oblasti patří mladá, často proglaciální, jezera přehrazená skalním podložím a velká jezera (s plochou > 100 000 m<sup>2</sup>) přehrazená morénou (Emmer a kol. 2016).

### 5.2.2 Jižní Andy

Tato kapitola zahrnuje v rámci analýzy ledovcové povodně, které se odehrály v pohoří Andy, na území států Chile a Argentiny (viz Obr. 6). Do současnosti bylo v databázi zaznamenáno 175 GLOFs pocházejících z 64 jezer, přičemž k nejvíce případům došlo v oblasti *Severopatagonského ledovcového pole*. K nejstaršímu zaznamenanému GLOF, došlo u bezejmenného jezera ve *střední části Chilsko-argentinských And*, poblíž města Santiago de Chile roku 1788.

V oblasti se vyskytují jak jezera hrazená ledovcem, která zapříčinila GLOF, v nadmořských výškách 44–4869 m, tak i jezera hrazená morénou v nadmořských výškách 27–2710 m. Výše položená jezera se nacházejí především v severnější části sledovaného regionu, zatímco níže položená jižněji, zejména v oblasti Patagonie. Z celkových 64 jezer, u kterých došlo k selhání hráze, se 56 z nich vyskytuje do nadmořské výšky 1500 m.

Obr. 6: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Jižní Andy (Veh a kol. 2022)



### 5.2.2.1 Jezerní hráze

Wilsonem a kol. (2018) bylo zjištěno, že se v regionu množství ledovcových jezer mezi lety 1986–2016 navýšilo o 43 % na celkový počet 4202. Nejvíce nových jezer bylo zaznamenáno v Patagonii a celková plocha všech jezer v regionu se za uplynulých 30 let zvýšila o 7 %. Plošně malá jezera se v roce 2016 nacházela v severní části regionu (průměrná velikost 0,02 km<sup>2</sup>), zatímco relativně velká v jižní Patagonii (průměrná velikost 1,53 km<sup>2</sup>).

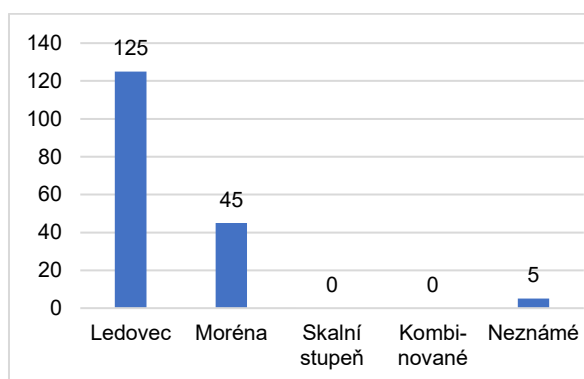
Zvyšování plochy jezer a jejich množství je způsobeno oteplováním klimatu (Rivera a kol. 2002). V roce 2016 se v oblasti nacházelo 52 % morénou hrazených jezer, 6 % ledovcem hrazených jezer a 19 % jezer s kombinovanou hrází či jezer nacházejících se za skalním stupněm (Wilson a kol. 2018).

Z Grafu 16 popisujícího typ přehrazení jezera v momentě, kdy došlo k selhání hráze a následnému vzniku GLOF vyplývá, že ve sledované oblasti došlo k vyliťí vody nejčastěji u jezer hrazených ledovcem, přičemž nejvíce dochází k záplavám tohoto typu ledovcových jezer v oblasti *Severopatagonského ledovcového pole*. V této oblasti včetně *Jihopatagonského ledovcového pole*, dochází zároveň i k četným výskytům GLOFs z jezer hrazených morénou. V rámci celé zkoumané oblasti je zdokumentováno pouze 5 případů, kdy nebyl způsob hrazení jezera známý.

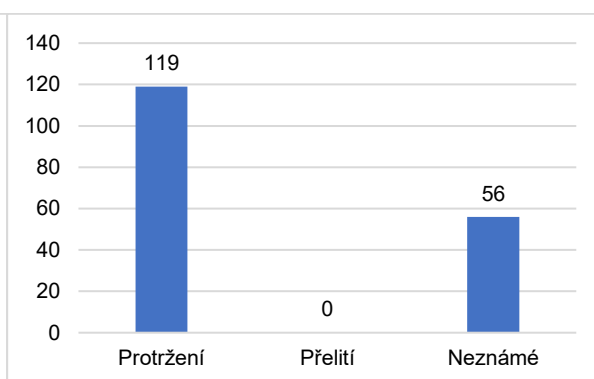
Zhruba u třetiny případů zaznamenaných ledovcových povodní, není známý způsob selhání hráze (viz Graf 17). Zajímavostí v tomto regionu ovšem je, že v rámci dvou třetin zaznamenaných případů způsobu selhání hráze nenastala jediná povodeň typu GLOF z důvodu přelití hráze.

Pouze u třech ledovcem hrazených jezer, které způsobily ledovcovou povodeň je znám podrobnější průběh narušení hráze. U všech tří jezer opakovaně docházelo ke GLOFs vylitím vody prostřednictvím subglaciálního tunelu vedoucího pod hrází, což u jednoho z těchto jezer nakonec vždy způsobilo destrukci velké části hráze. U poloviny případů morénou hrazených jezer došlo k protržení hráze a u druhé poloviny je způsob selhání hráze neznámý.

Graf 16: Způsob přehrazení jezera v regionu Jižní Andy  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 17: Způsob selhání hráze v regionu Jižní Andy  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



### 5.2.2.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky

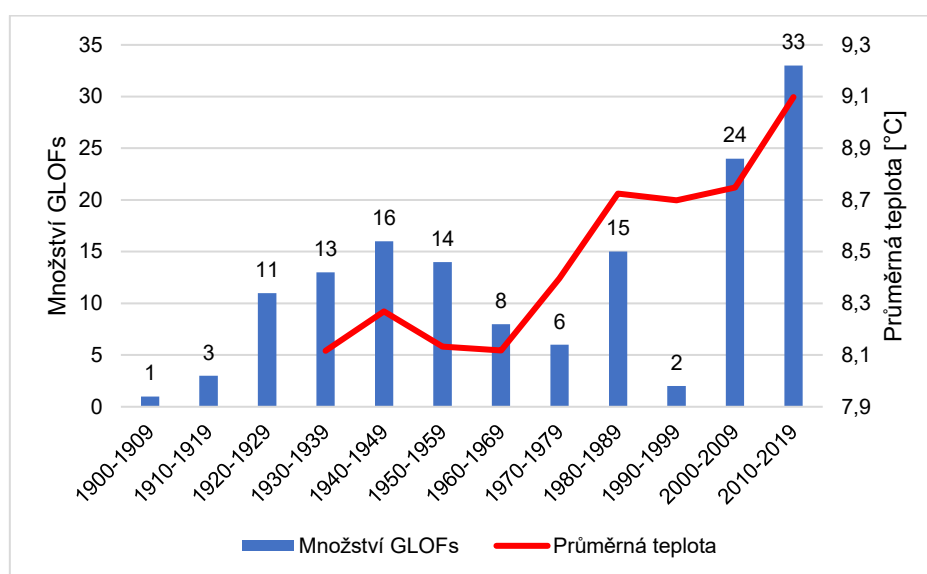
V Grafu 18 je porovnávána četnost GLOFs s průměrnou teplotou naměřenou na stanici *Esquel Aero* nacházející se poblíž *Severopatagonského ledovcového pole* v nadmořské výšce 799 metrů (Meteoblue 2023). Zmíněná stanice začala sbírat data o teplotě až od 30. let 20. století. Z toho důvodu nejsou starší data o teplotě v grafu uvedena. Množství ledovcových povodní za celou dobu pozorování koreluje s naměřenou průměrnou teplotou. Nejméně GLOFs bylo v databázi zaznamenáno v letech 1900–1919, naopak nejvíce v letech 2010–2019, kdy byl výskyt těchto událostí mnohonásobně vyšší.

Nedávné oteplení v celém regionu zapříčinilo recesi ledovců a snížení podílu srážek ve formě sněhu (Rasmussen a kol. 2007). Podle Rignot a kol. (2003) došlo v Patagonských Andách mezi lety 1970–2000 k dvojnásobnému urychlení ztráty ledovcové hmoty. Navíc bylo zjištěno, že v letech 2000–2008, byl úbytek v jižní oblasti Patagonie větší než v její severní části (Dussaillant a kol. 2019).

Na základě Grafu 18 nastalo první prudké navýšení počtu ledovcových povodní v letech 1920–1949. Druhý razantnější nárůst množství GLOFs započal v roce 1970, souběžně s navýšením průměrné teploty, a přetrvává až do současnosti. Pouze mezi lety

1990–1999 není podle Grafu 18 trend souvislého nárůstu ledovcových povodní potvrzen. Tuto anomálii lze vysvětlit tím, že u 8 zaznamenaných případů GLOFs, které nastaly mezi lety 1984–2001, nešlo na základě získaných dat přesně určit desetiletí, kdy k událostem došlo, a proto nebyly do daných časových intervalů začleněny. Podobně je na tom dalších 6 událostí, které ze stejného důvodu nešlo přiřadit do desetiletí 2000–2009 a 2010–2019. Mezi lety 2020–2022 byl zatím zaznamenán pouze jeden případ GLOF, a to v únoru roku 2021.

Graf 18: Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Jižní Andy, vlastní zpracování (NASA 2019; Veh a kol. 2022)



### 5.2.2.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce

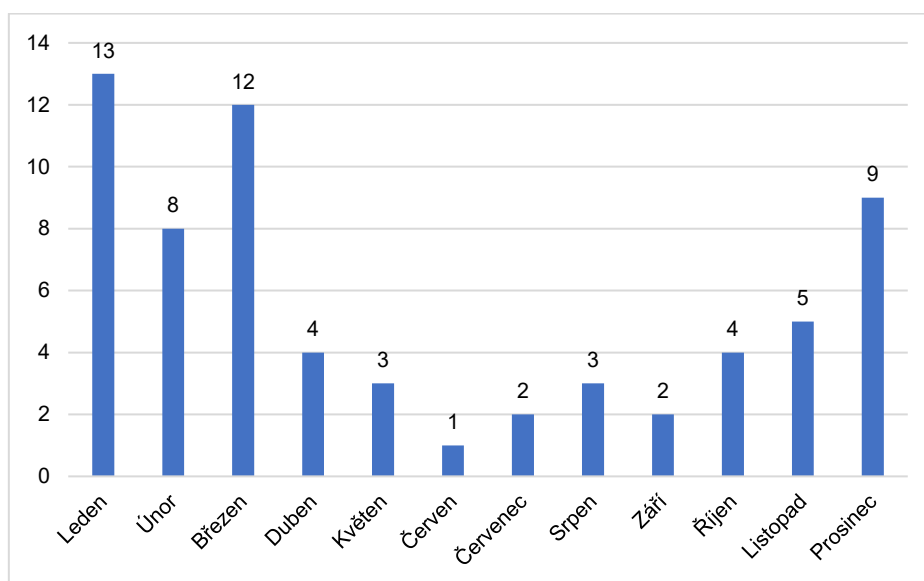
U 66 případů ze 175 je znám měsíc, kdy došlo k ledovcové povodni (viz Graf 19). Nejvíce událostí proběhlo v měsících prosinec–březen, naopak nejméně v období duben–listopad.

Různé četnosti za jednotlivé měsíce mohou být vysvětleny pomocí Grafu 20, který zobrazuje klimatické podmínky pro oblast *Jihopatagonského ledovcového pole* ve výšce 1353 m n. m. V době nejvyšších četností GLOFs, jsou ve sledovaném regionu průměrné denní teploty a úhrn srážek nejvyšší v rámci celého roku. Díky kladným teplotám a vysokému úhrnu srážek, dochází zejména mezi měsíci prosinec–březen k tání většího množství sněhu a ledu, což následně vede k rychlému plnění ledovcových jezer vodou (Maurer a kol. 2019).

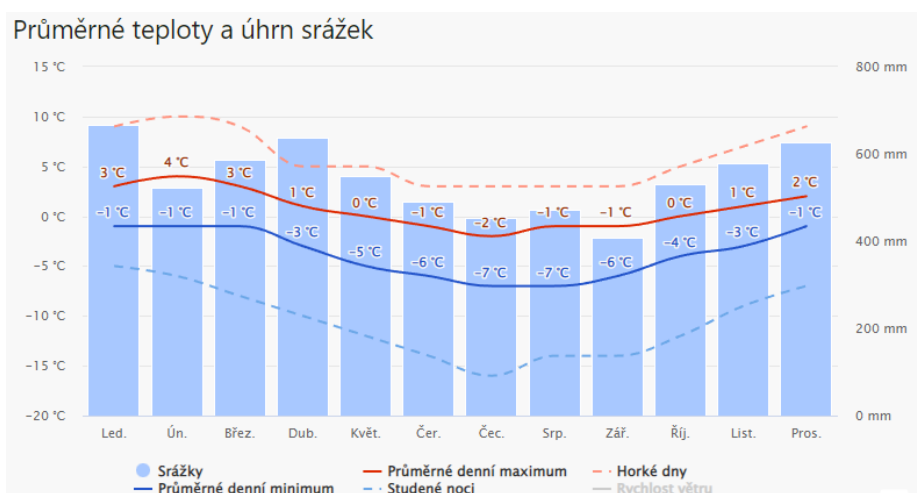
V rámci roku je v chladnějších měsících duben–listopad míra tání sněhu a ledu minimální a množství ledovcových povodní je za jednotlivé měsíce nejmenší. Nicméně úhrn srážek je po celý rok stále vysoký, čímž dochází k částečnému plnění ledovcových jezer vodou (Maurer a kol. 2019) i v tomto období. V okamžiku většího množství vody v jezeře může být jeho hráz náchylnější na jakoukoli možnou autodestruktivní či dynamickou příčinu, která by způsobila její selhání (Jain a kol. 2012). Z důvodu, že se jezera neustále plní vodou, mohou představovat větší nebezpečí po celý rok (Zhang a kol. 2015).

Rozkolísanost ročního úhrnu srážek během let je v regionu ovlivňována El Niño jižní oscilací (Bown a Rivera 2007), která způsobuje vyšší úhrn srážek zejména podél západního pobřeží severně od 40° j. z. š. a nižší úhrn jižně od 58° j. z. š. (Schneider a Gies 2004). Zároveň i samotný úhrn srážek je v regionu poměrně variabilní. V severní části regionu, kde je klima semiaridní, je úhrn srážek oproti jižním oblastem nižší. Jižněji se klima stává vlhčím a roční úhrn srážek se může pohybovat v rozmezí 500 mm až 6000 mm za rok (Masiokas a kol. 2009).

Graf 19: Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Jižní Andy  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 20: Klimadiagram Jihopatagonského ledovcového pole ve výšce 1353 m n. m. (Meteoblue 2023)



#### 5.2.2.4 Četnost opakování GLOFs

Podle Tabulky 4 se v regionu Jižní Andy nejčastěji vyskytují jezera hrazená morénou, která zapříčinila GLOF povětšinou pouze jednou. V menším množství se zde nachází jezera

hrazená ledovcem, u kterých ale dochází k opakovanému selhání hráze nejčastěji. Neznámý typ hráze spadá za celou dobu pozorování pouze ke 3 jezerům z celkových 64. V průběhu celého analyzovaného období nedošlo u žádného ze zmíněných jezer ke změně typu jezerní hráze.

K nejpočetnějším selhání hráze došlo ve sledované oblasti u jezera Lago Arco hrazeného ledovcem Colonia, nacházejícího se v oblasti *Severopatagonského ledovcového pole*. Zmíněné jezero způsobilo celkem 46 povodní typu GLOF, přičemž k první záplavě došlo roku 1881, následně mezi lety 1920–1967 docházelo k ledovcovým povodním téměř každoročně. Od roku 1967 nebyla žádná další podobná událost z tohoto jezera zaznamenána, což bylo způsobeno vytvořením stabilního povrchového odtoku do jezera Lago Colonia (Harrison a Winchester 2000). Dále se zde vyskytují další dvě jezera hrazená ledovcem, u kterých selhala hráz minimálně dvacetkrát.

Tab. 4: Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Jižní Andy  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Typ přehrazení jezera	1	2–10	> 10
Ledovec	11	5	3
Moréna	39	3	0
Skalní stupeň	0	0	0
Kombinované	0	0	0
Neznámé	2	1	0
Celkem	52	9	3

### 5.2.2.5 Shrnutí

V regionu Jižní Andy byly zaznamenány GLOFs pocházející pouze z jezer hrazených morénou či jezer hrazených ledovcem. Celkem zde bylo zdokumentováno 64 jezer u kterých selhala hráz, přičemž ve většině případů se jedná o jezera hrazená morénou. Zbylá jezera měla buď typ hráze v okamžiku selhání neznámý nebo se jednalo o jezera hrazená ledovcem, která v oblasti způsobila nejvíce povodní. Za celou dobu pozorování byly zaznamenány pouze případy, kdy byly GLOFs způsobeny protržením hráze. Naopak nebyl v souvislosti s ledovcovou povodní archivován jediný případ, kdy došlo k jejímu přelití. Nicméně u třetiny případů zůstává způsob selhání hráze neznámý.

Od 70. let minulého století začíná docházet k velkému nárůstu povodní, kdy dominuje selhání hrází u jezer hrazených morénou. V první polovině 20. století se na množství záplav významně podílelo jezero Lago Arco, u kterého docházelo mezi lety 1920–1967 ke GLOF téměř každoročně.

Korelace množství ledovcových záplav s rostoucí průměrnou teplotou naznačuje, že počet případů bude v čase stále narůstat. V rámci roku dochází ke GLOFs nejčastěji



v měsících prosinec–březen, což může být způsobeno zejména kladnými průměrnými denními teplotními maximy v kombinaci s vysokými měsíčními úhrny srážek.

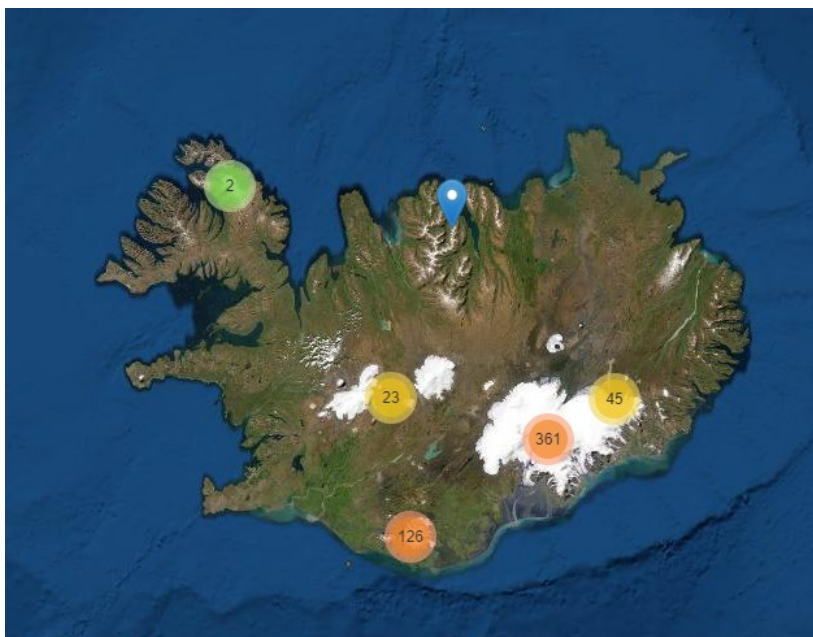
## 5.3 Evropa

### 5.3.1 Island

V této kapitole jsou analyzovány události GLOFs, které nastaly na území ostrova Island (viz Obr. 7). Do současnosti je v databázi zahrnuto 591 ledovcových povodní. Jezer, u kterých došlo k selhání hráze, bylo zaznamenáno 83. Nejvíce případů nastalo v oblasti Národního parku Vatnajökull. Nejstarší ledovcová povodeň se odehrála roku 850 u jezera Kötluaskjan. Toto jezero je překryto ledovcem Mýrdalsjökull nacházejícího se na místním vulkánu Katla, který svojí erupcí zapříčinil GLOF (Veh a kol. 2022).

K ledovcovým povodním zde došlo převážně z ledovcem hrazených jezer nacházejících se ve výškách 171–2001 m n. m. a ze dvou jezer hrazených skalním stupněm ve výškách 459 m n. m. a 739 m n. m. Dále zde bylo zaznamenáno několik událostí, u kterých není přesně známo z jakého jezera a v jaké nadmořské výšce k nim došlo. 46 jezer z celkových 83 zaznamenaných se nachází v nadmořských výškách 400–1100 metrů.

Obr. 7: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Island (Veh a kol. 2022)



#### 5.3.1.1 Jezerní hráze

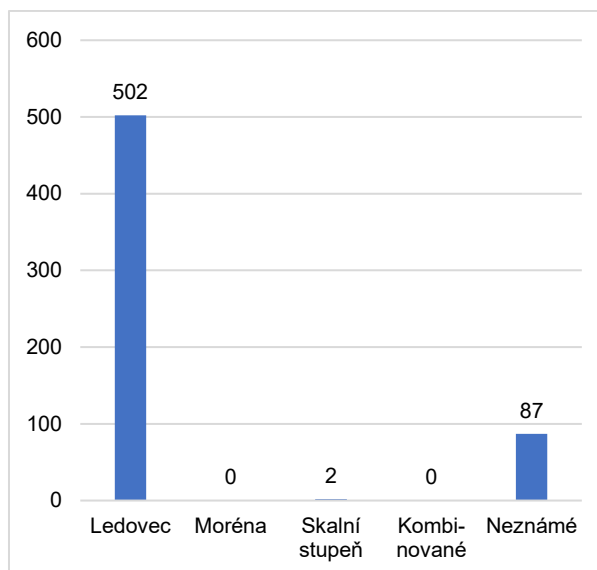
V rámci celého ostrova Island dominují dle Grafu 21 případy ledovcových povodní, které vznikly u ledovcem hrazených jezer. Mezi lety 850–1900 jsou v databázi převážně zaznamenány události GLOFs, které byly vyvolány vulkanismem. Od prvního známého GLOF bylo hlášeno nejméně 80 subglaciálních vulkanických erupcí, z nichž mnohé způsobily plošně rozsáhlé jökulhlaupy (*Typ ledovcové povodně vyskytující se u subglaciálních jezer*

v neovulkanické zóně (Björnsson 1988). V menším měřítku vzniká během vulkanické erupce (Björnsson 2003). Povětšinou však vzniká v relativně pravidelných intervalech hromaděním roztaveného ledu a sněhu v subglaciálním jezeře vlivem magmatického ohřevu. V poslední fázi dochází k protržení ledovcové hráze a následnému odtoku jezerní vody (Björnsson 1992; Björnsson 2003)) s dramatickým dopadem na obydlené oblasti a tvar místního reliéfu (Björnsson 1992). Data o výskytu jökulhlaupů na Islandu za minulá staletí jsou získávána například z letopisů a středověkých dokumentů (Thorarinsson 1974). Nejdostupnější informace o místních GLOFs pochází až od počátku 21. století, kdy bylo do současnosti zdokumentováno přibližně 500 případů.

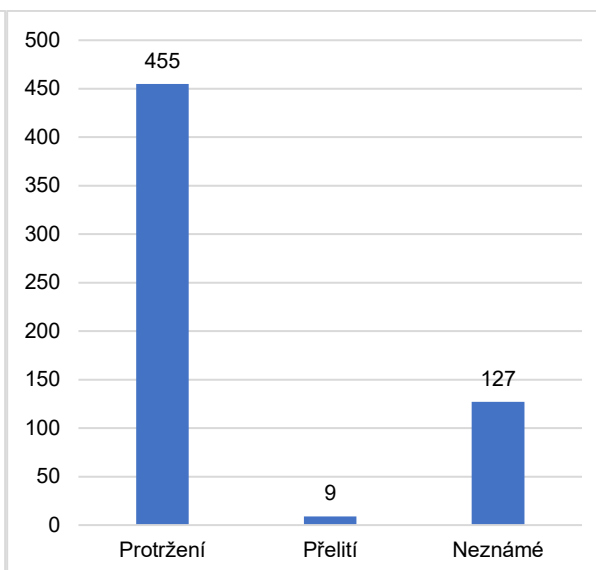
Kromě velkého množství ledovcových povodní pocházejících z ledovcem hrazených jezer, zde bylo také dvakrát zaregistrováno vylití vody z jezer hrazených skalním stupněm. Dále zde bylo zdokumentováno 87 ledovcových povodní s neznámým způsobem přehrazení jezera, u kterých povětšinou nebylo jisté, zda bylo jezero v době vzniku GLOF stále hrazeno ledovcem nebo nově vzniklou morénovou hrází.

V oblasti proběhla dle Grafu 22 téměř pětina událostí, u kterých byl způsob selhání hráze neznámý. V rámci dostupných dat výrazně dominují případy, kdy byl GLOF vyvolán protržením hráze. U 451 případů, kdy se hráz protrhla, došlo k odtoku vody pod ledovci, které většinu ledovcových jezer ve vymezeném regionu překrývají (Björnsson 1992). Jelikož se zhruba 60 % ledovců na Islandu nachází na aktivní neovulkanické zóně (Björnsson 1992), nadpoloviční množství z těchto událostí bylo podle databáze způsobeno urychleným táním ledu a sněhu, které bylo zapříčiněno magmatickým ohřevem (povodeň typu jökulhlaup). Vzhledem k tomu, že je Island oblast s dlouhodobou vulkanickou aktivitou (Björnsson 1992), lze usuzovat, že byla oblast i v minulých stoletích velmi bohatá na vznik GLOFs.

Graf 21: Způsob přehrazení jezera v regionu Island  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 22: Způsob selhání hráze v regionu Island  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



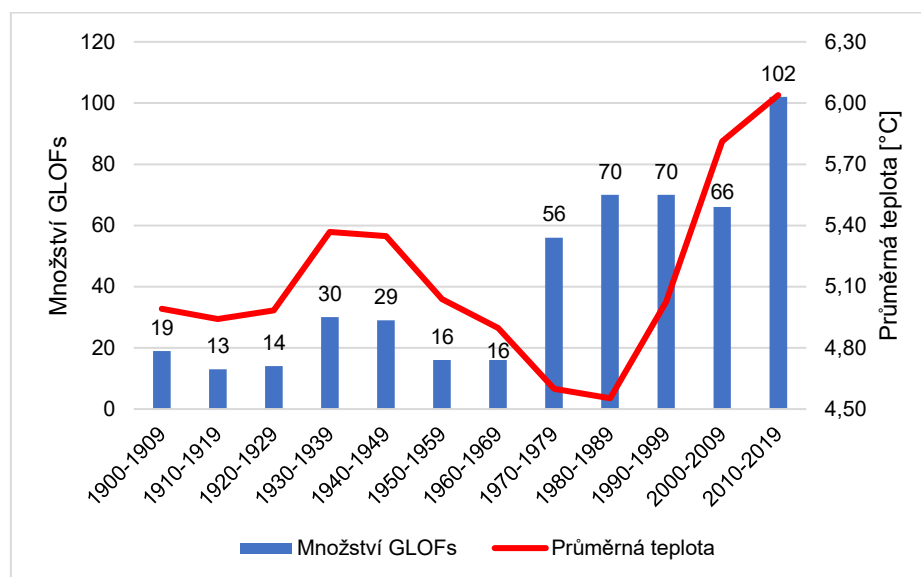
### 5.3.1.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky

Ve vymezené oblasti dochází ke GLOFs během let 1900–2019 velmi často (viz Graf 23). Pouze 13 ledovcových povodní nastalo za toto sledované období mezi lety 1910–1919, naopak nejvíce v letech 2010–2019, kdy bylo zjištěno až 102 případů. Relativně vysoká četnost takových událostí je v oblasti podmíněna vulkanismem (Björnsson 1992) a výskytem ledovcem hrazených jezer, jejichž hráze se mohou často po jejich narušení opětovně obnovit (Dussaillant a kol. 2010).

V Grafu 23 je porovnávána četnost GLOFs s průměrnou teplotou naměřenou na stanici *Vestmannaeyjar* v nadmořské výšce 118 metrů (Meteoblue 2023). Jedním z nejviditelnějších důsledků klimatických změn na Islandu jsou ustupující ledovce a tvorba proglaciálních jezer. Odhaduje se, že islandské ledovce ztratily mezi lety 1890–2020 zhruba 16 % své hmoty. Výjimečně teplé období v průběhu zmíněného období nastalo v oblasti ve 20. a 30. letech 20. století. Naopak chladnější období následované nárůstem ledovcové hmoty nastalo přibližně v letech 1970–1995. Od konce 20. století teploty opět narůstají, což přetrvává až do současnosti (Sæmundsson a kol. 2023). V důsledku deglaciace se jökulhlaupy vyskytují častěji ale zároveň klesá jejich míra dopadů. Deglaciace zároveň způsobuje výrazné snížení počtu ledovcem hrazených jezer, u kterých k jökulhlaupům dochází (Björnsson 1992).

Mezi lety 2020–2022 jsou zaznamenány pouze dvě povodně typu GLOF. Nicméně vzhledem k jejich vysoké četnosti v předchozím desetiletí je nejpravděpodobnější, že v nedávné době zatím neproběhnul žádný podrobnější výzkum, zabývající se výskytem GLOFs vzniklých v průběhu zmíněných let.

Graf 23: Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Island vlastní zpracování (NASA 2019; Veh a kol. 2022)

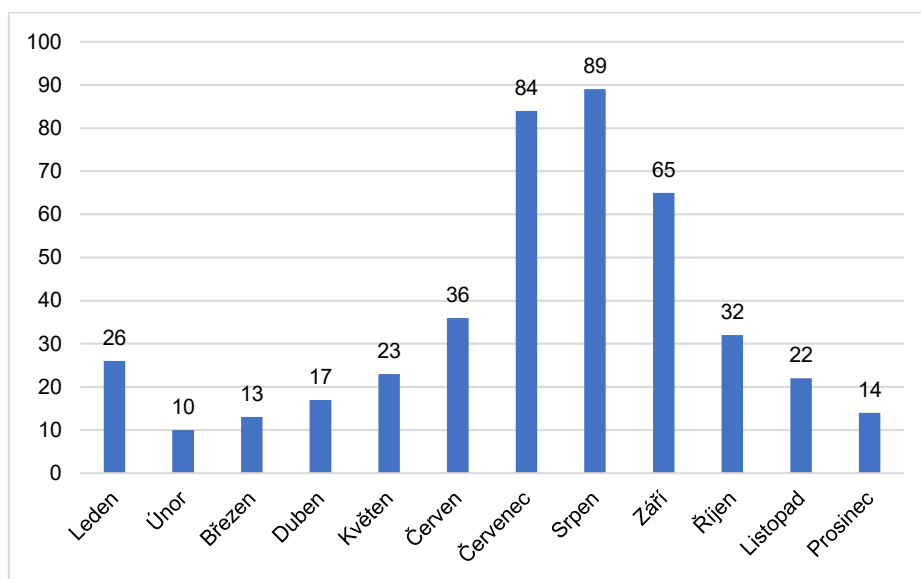


### 5.3.1.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce

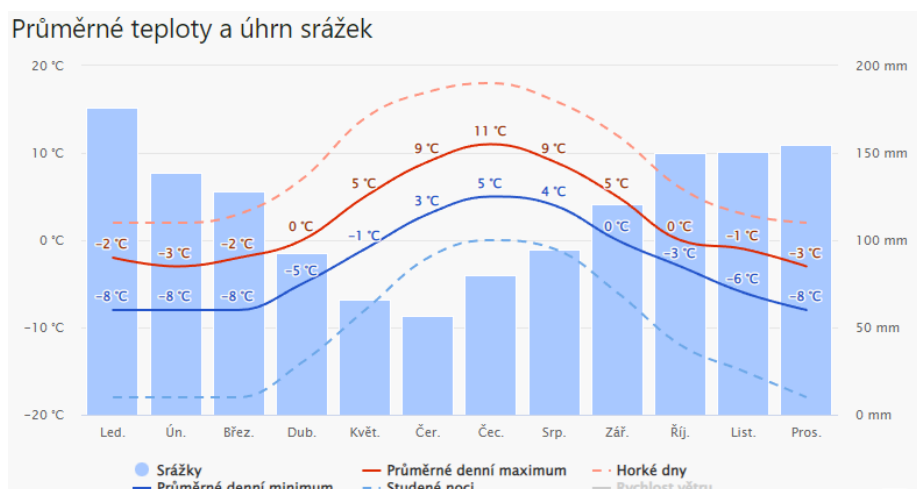
Nejvíce případů se v regionu Island vyskytuje během měsíců červenec–září, zatímco nejméně v měsíci únor (viz Graf 24). V rámci celého sledovaného období se zde nachází vysoké množství zdokumentovaných ledovcových povodní, u kterých je znám přesný měsíc jejich vzniku.

Graf 25 zobrazuje klima pro oblast Národního parku Vatnajökull ve výšce 773 m n. m. Na ostrově Island je podle grafu velká roční amplituda teploty s nejvyššími kladnými průměrnými denními teplotními maximy v měsících květen–září. Nejvyšší úhrn srážek je v měsících říjen–březen, což jsou zároveň měsíce, kde průměrné denní teplotní maximum nedosahuje kladných hodnot. V období většího úhrnu srážek tak dochází k postupnému hromadění sněhu, který začne nárazově tát zejména v průběhu léta, kdy jsou teploty nejvyšší. V létě se díky hromadnému tání začínají ledovcová jezera rychle plnit vodou a jsou tak v tomto období nejnáchylnější k selhání jejich hráze (Singh a kol. 2011). Relativně vysoký výskyt zaznamenaných GLOFs v každém měsíci v roce je ovlivněn hlavně vulkanismem přetrvávajícím po celý rok (Björnsson 1992).

Graf 24: Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Island  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 25: Klimadiagram Národního parku Vatnajökull ve výšce 773 m n. m. (Meteoblue 2023)



### 5.3.1.4 Četnost opakování GLOFs

Z celkově zaznamenaných 83 jezer dominují ve sledované oblasti jezera hrazená ledovcem (viz Tab. 5), u kterých zároveň dochází k vysoké četnosti opakovaných případů selhání hrází. Dále se zde nacházejí dvě jezera hrazená skalním stupněm, u kterých došlo k vyliťí vody pouze jednou. V regionu se nachází také vysoké množství jezer, jejichž typ hrází byl v okamžiku posledního selhání hráze neznámý. Za celé období pozorování došlo u 4 jezer (u všech nastalo narušení hráze pouze dvakrát) ke změně typu hráze vždy tak, že se v prvním případě selhání jednalo o hráz ledovcovou a v druhém o hráz přehrazenou neznámým materiálem. U všech ostatních jezer zůstal typ hráze vždy definován stejně.

K nejčastějšímu selhání hráze došlo u ledovcem hrazeného jezera Vatnsdalslón, u kterého byl první případ ledovcové povodně zaznamenan roku 1898. K záplavám

z tohoto jezera docházelo téměř každoročně prostřednictvím subglaciálního odtoku vody pod ledovcovou hrází. Poslední případ GLOF nastal u jezera roku 1989 a jeho hráz tak selhala celkem 81krát. K dalším GLOFs z tohoto jezera nedocházelo pravděpodobně kvůli jeho zániku způsobeného recesí ledovce. Dále je zaznamenáno dalších 5 jezer, u kterých se vylila voda více než dvacetkrát, přičemž povětšinou se jednalo o ledovcovou povodeň typu jökulhlaup.

Tab. 5: Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Island  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Typ přehrazení jezera	1	2–10	> 10
Ledovec	22	23	8
Moréna	0	0	0
Skalní stupeň	2	0	0
Kombinované	0	0	0
Neznámé	19	8	1
Celkem	43	31	9

### 5.3.1.5 Shrnutí

V regionu Island pocházejí GLOFs nejčastěji z ledovcem hrazených jezer, u kterých často dochází k opakovanému selhání hrází. Dále zde GLOFs způsobily 2 jezera za skalním stupněm společně s větším množstvím jezer, kde je typ hráze neznámý. Morénou hrazené jezero nebylo v databázi zaznamenáno ani jednou, nicméně lze časem předpokládat jejich postupný výskyt v důsledku růstu teploty vzduchu, která na Islandu urychluje ústup ledovců (Sæmundsson a kol. 2023). Nejčastěji zde dochází k protržení ledovcové hráze, přičemž u zhruba poloviny GLOFs se jednalo o jökulhlaup, tedy o vylití vody z podledovcového jezera.

K nejvíce případům ledovcových povodní dochází od 2. poloviny 20. století, kdy se jejich počet, oproti první polovině minulého století, téměř zdvojnásobil. Postupné zvyšování četnosti GLOFs je v regionu Island podmíněno zejména neustálým nárůstem teploty vzduchu (Sæmundsson a kol. 2023).

Množství ledovcových povodní je relativně velké po celý rok díky zvýšenému vulkanismu (Björnsson 1992). Nejvíce GLOFs vzniká ve sledované oblasti během léta, kdy dochází k intenzivnímu tání ledu a sněhu, který přibývá zejména v chladných měsících díky vyššímu úhrnu srážek.

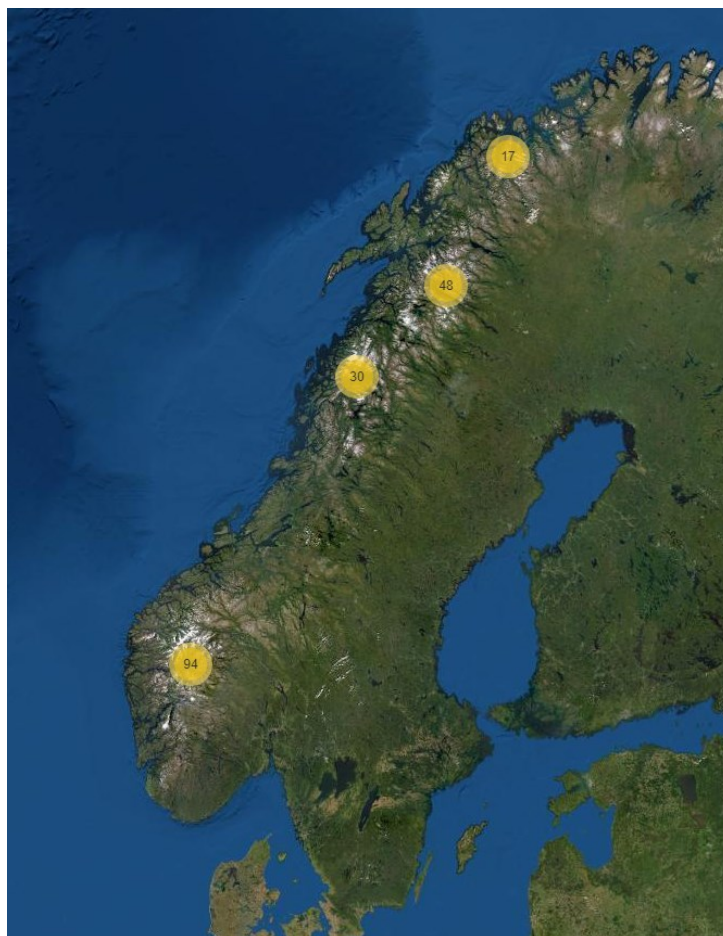
### 5.3.2 Skandinávie

V této kapitole jsou analyzovány zdokumentované GLOFs, které se odehrály ve Skandinávském pohoří na území států Norska a Švédska (viz Obr. 8). Za celé zkoumané období bylo zaznamenáno celkem 189 ledovcových povodní, pocházejících ze 34 ledovcových jezer. Nejvíce GLOFs nastalo v jižní části Skandinávského pohoří, kde zároveň došlo

k nejstarší zaznamenané události roku 1741 vzniklé selháním neznámého typu hráze u jezera Skadevatn přiléhajícího k ledovci Vetlefjordbreen.

Ve sledované oblasti se vyskytují jak ledovcem hrazená jezera, která zapříčinila GLOF, v nadmořských výškách 380–1966 metrů, tak jezero hrazené morénou v nadmořské výšce 999 metrů. Celkem 18 ze 34 zkoumaných jezer se nachází v nadmořských výškách 1200–1700 metrů.

Obr. 8: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Skandinávie (Veh a kol. 2022)



### 5.3.2.1 Jezerní hráze

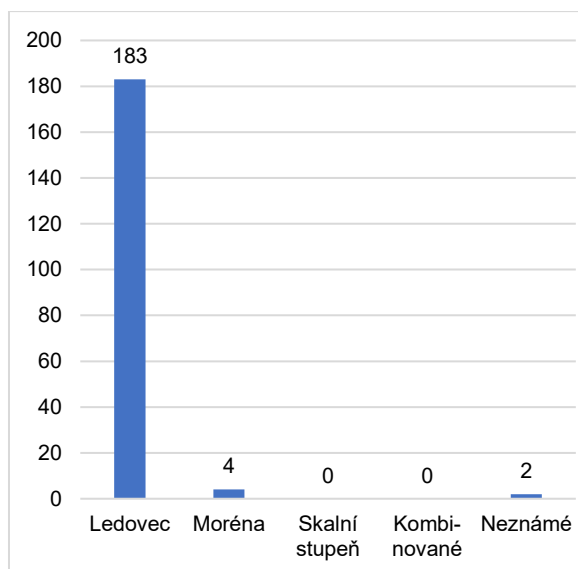
Podle Grafu 26 dochází k ledovcovým povodním na území Skandinávského pohoří převážně z ledovcem hrazených jezer. Velmi malé množství GLOFs dále pochází z morénou hrazeného jezera, případně z jezera, kde byl typ hráze v okamžiku jejího selhání neznámý.

V regionu Skandinávie jsou více než 2/3 způsobů selhání hráze v okamžiku GLOF neznámé (viz Graf 27). U všech známých případů se vždy jednalo o její protržení. Protržení hráze bylo pouze v jednom případě zaznamenáno u morénou hrazeného jezera a ve všech ostatních případech u ledovcem hrazených jezer, které se ve sledované oblasti nachází především v podobě supraglaciálních (nacházejících se na povrchu ledovce) jezer. Ze všech zdokumentovaných případů protržení hráze u ledovcem hrazených jezer došlo ke dvěma

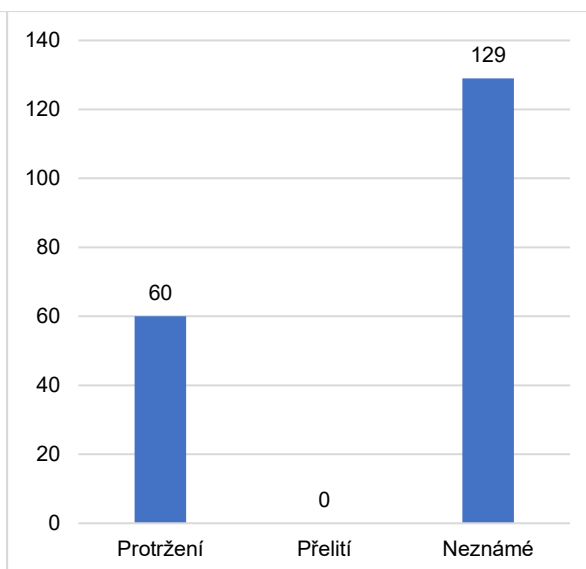


z nich otevřením subglaciálního tunelu, odvádějícího vodu pod hrází, kdy následná eroze tunelu způsobila destrukci hráze. V ostatních případech vždy nastala okamžitá destrukce hráze s následným vylitím vody z jezera (Veh a kol. 2022).

Graf 26: Způsob přehrazení jezera v regionu Skandinávie  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 27: Způsob selhání hráze v regionu Skandinávie  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



### 5.3.2.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky

V Grafu 28 je porovnávána četnost GLOFs s průměrnou teplotou naměřenou na stanici *Torungen Fyr* v nadmořské výšce 12 metrů (Meteoblue 2023). Na základě analyzovaných dat, nastal pouze jeden GLOF v letech 1910–1919 a naopak nejvíce GLOFs vzniklo v letech 2010–2019, kdy jejich četnost činila 53 případů.

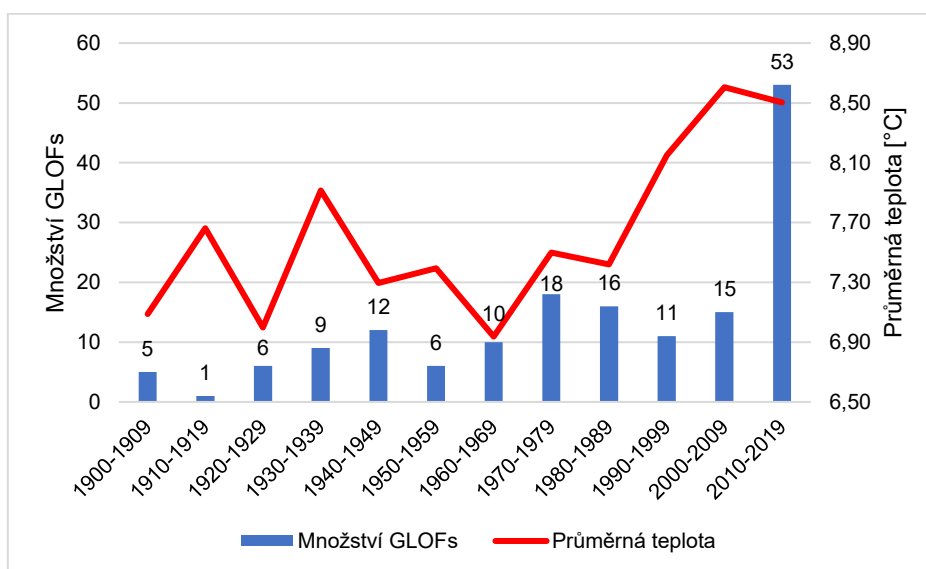
Oteplování v regionu vedlo v průběhu 20. století k častějším případům GLOFs (Xu a kol. 2015) a zároveň se podílí na všeobecném ústupu ledovců, z nichž většina do roku 2100 zcela zanikne. Ve spojitosti s ústupem ledovců se očekává rostoucí frekvence případů GLOFs i v následujících letech (Bogen a kol. 2015). Nicméně během závěrečné fáze ústupu ledovců, kdy je již většina ledovců roztátá, se mohou ledovcová jezera proměnit v sezónní nebo endorheická (bezodtoká) jezera či mohou zcela zaniknout, což by následně mohlo vést k poklesu ledovcových povodní (Emmer a kol. 2016).

GLOFs jsou v oblasti spouštěny převážně ledovcem hrazenými jezery, jejichž náchylnost k vyvolání GLOF s rostoucí teplotou narůstá (Xu a kol. 2015). Množství narůstajících případů ledovcových povodní není v letech 1900–2009 příliš výrazné. Naopak skokový nárůst lze pozorovat až mezi lety 2010–2019, kdy byl počet případů oproti předchozímu desetiletí zhruba trojnásobný.



Razantní nárůst četnosti GLOFs v letech 2010–2019 nelze vysvětlit žádnými dynamickými příčinami, které by způsobili okamžité vylití vody z většího množství ledovcových jezer (např. zemětřesení či vulkanismus). Zároveň je nepravděpodobné, aby postupné urychlování tání ledu a sněhu způsobilo okamžitý nárůst ledovcových povodní v průběhu deseti let. Jako nejpravděpodobnější možnost skokového nárůstu počtu GLOFs se jeví ta, že byly ledovcové povodně podrobně zaznamenávány až mezi lety 2010–2019 a že tak chybí detailnější záznamy o jejich výskytu v předchozích desetiletích. Mezi lety 2020–2022 bylo zaznamenáno pouze pět případů GLOFs, z nichž poslední byl zdokumentován 06.09.2020.

Graf 28: Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Skandinávie  
vlastní zpracování (NASA 2019; Veh a kol. 2022)



### 5.3.2.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce

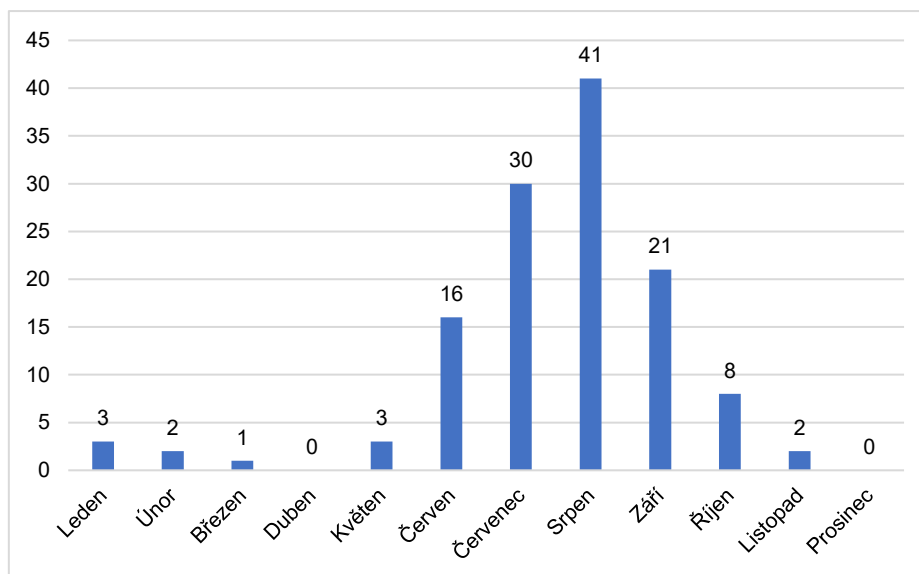
Dle Grafu 29 dochází na území Skandinávského pohoří k minimálnímu výskytu GLOFs v měsících listopad–květen. Naopak nejvíce událostí probíhá v měsících červen–říjen, kdy je největší počet zaznamenaných GLOFs v měsíci srpen.

Na Grafu 30 je znázorněn klimadiagram zahrnující úhrn srážek a průměrnou teplotu pro oblast ledovce Baklibreen ve výšce 1260 m n. m. nacházejícího se v jižní části Skandinávského pohoří. Klimadiagram vykazuje velkou roční amplitudu teploty s nejvyššími teplotami v měsících červenec a srpen kdy přetrvávají kladné teploty po celý den. Nejmenší teploty jsou zaznamenány v měsících prosinec–březen, kdy jsou po celý den záporné a zároveň v těchto měsících dochází v rámci celého roku k nejvyššímu úhrnu srážek.

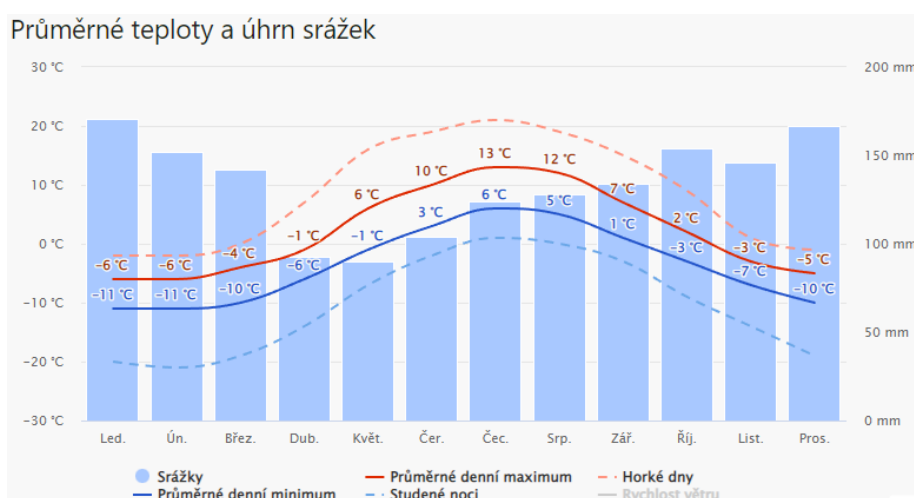
Četnost GLOFs v rámci celého roku velmi koreluje s průměrnou denní teplotou za jednotlivé měsíce. Tato korelace naznačuje, že hlavní příčinou vzniku ledovcových povodní je tání ledu a sněhu zejména v letním období. Je tak pravděpodobnější, že v databázi GLOFs

(Veh a kol. 2022) chybí záznamy o zvyšujícím se množství ledovcových povodní, které se odehráli před rokem 2010 (viz Graf 28).

Graf 29: Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Skandinávie  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 30: Klimadiagram jižní části Skandinávského pohoří ve výšce 1260 m n. m. (Meteoblue 2023)



### 5.3.2.4 Četnost opakování GLOFs

Dle Tabulky 6 se z jezer, která zapříčinila ledovcovou povodeň, vyskytují ve sledovaném regionu Skandinávie převážně ledovcem hrazená jezera. U nadpoloviční většiny ledovcem hrazených jezer dochází k protržení hráze více než jednou a četnost opakovaných protržení je tak v tomto regionu vysoká.

Ze všech jezer, které způsobily GLOF zde bylo zaznamenáno pouze jedno, které je hrazeno morénou a jedno, u kterého byl typ hráze v okamžiku selhání neznámý. V rámci všech analyzovaných jezer nedošlo za celé sledované období u žádného z nich k jakékoliv změně

jezerní hráze. Pouze u jednoho ledovcem hrazeného jezera, kde docházelo k opakovanému vyhlížení vody, byl typ hráze během jejího prvního zaznamenaného selhání neznámý. Nicméně je velmi pravděpodobné, že se i v tomto případě jednalo o ledovcovou hráz.

Bezejmenné ledovcem hrazené jezero, které způsobilo v regionu Skandinávie nejvíce GLOFs je umístěno na úpatí vrcholu Sälka nacházejícího se v severní části Skandinávského pohoří na území Švédska. Hráz tohoto jezera selhala celkem 36krát, kdy mezi lety 1964–1994 došlo ke GLOF každoročně. Poslední selhání hráze nastalo u tohoto jezera roku 2003. Dále se zde nachází 6 jezer, u kterých selhala hráz více než 10krát.

Tab. 6: Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Skandinávie  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Typ přehrazení jezera	1	2–10	> 10
Ledovec	11	14	7
Moréna	0	1	0
Skalní stupeň	0	0	0
Kombinované	0	0	0
Neznámé	1	0	0
Celkem	12	15	7

### 5.3.2.5 Shrnutí

Ve sledovaném regionu je pouze jedno jezero, z celkových 34, hrazené morénou. Ostatní jezera jsou převážně hrazená ledovcem, u kterých z nadpoloviční většiny nastalo opakované selhání hráze. Ze všech známých případů způsobu selhání hráze došlo vždy k protržení ledovcové, případně morénové hráze.

V průběhu let 1900–2009 docházelo k nárůstu množství GLOFs velmi pomalu, naopak v letech 2010–2019 bylo množství GLOFs oproti minulým desetiletím mnohem vyšší. Skokový nárůst je nejpravděpodobněji způsoben menší dostupností dat o ledovcových povodních, které se odehráli před rokem 2010. Jelikož je výskyt GLOFs ve zkoumané oblasti podmíněn intenzitou tání, lze očekávat jejich rostoucí četnost i v následujících letech (Bogen a kol. 2015).

### 5.3.3 Alpy

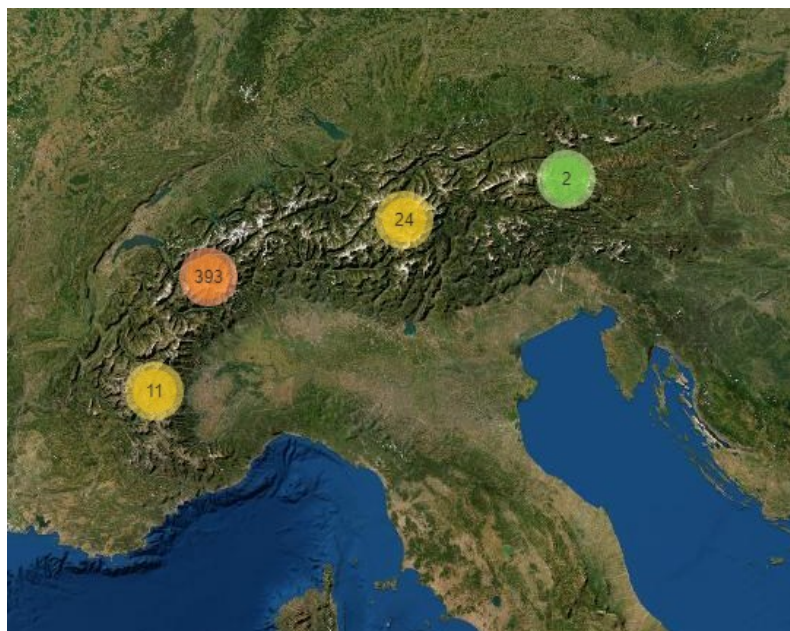
V této kapitole jsou analyzovány GLOFs, které se vyskytly v pohoří Alpy. Za celé sledované období bylo v tomto pohoří zdokumentováno celkem 433 případů ledovcových povodní pocházejících ze 102 jezer. Obr. 9 zobrazuje pouze 430 GLOFs. Důvodem je, že u 3 ledovcových povodní není známo z jakého ledovcového jezera pochází, a proto není vyznačena jejich přesná lokalizace.

Nejvíce GLOFs bylo ve sledované oblasti zdokumentováno ve švýcarských Alpách, kde zároveň došlo k nejstarší ledovcové povodni roku 1476 selháním neznámého typu hráze

u bezejmenného jezera nacházejícího se u ledovce Plan Névé. Jezera, u kterých došlo k vylití vody v důsledku selhání hráze, byla v regionu zaznamenána nejen ledovcem hrazená v nadmořských výškách 1500–3575 metrů, ale také morénou hrazená v nadmořských výškách 1817–3060 metrů. Největší výskyt ledovcových jezer, u kterých selhala hráz, je v nadmořských výškách 2400–2900 metrů, kde se z celkových 102 zaznamenaných jezer nachází 50 jezer.

V roce 2019 bylo v Alpách identifikováno celkem 498 ledovcových jezer s plochou větší než 0,01 km<sup>2</sup>. V oblasti se vyskytují jak jezera, která nejsou hrazená ledovcem (79,8 %), tak ledovcem hrazená jezera (20,2 %), z nichž 8,8 % jsou jezera supraglaciální. Z hlediska rozložení nadmořské výšky je téměř polovina jezer soustředěna mezi 2 250 a 2 750 m nad mořem, kde ledem přehrazená jezera jsou ve vyšších výškách než ledovcová jezera, která jím hrazená nejsou. 86,3 % identifikovaných jezer je menších než 0,1 km<sup>2</sup> a zaujímají 58,2 % celkové plochy ledovcových jezer (Ma a kol. 2021).

Obr. 9: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Alpy (Veh a kol. 2022)



### 5.3.3.1 Jezerní hráze

V pohoří Alpy je téměř vždy známý způsob přehrazení jezera v okamžiku, kdy došlo k selhání hráze (viz Graf 31). 384 zjištěných případů GLOFs nastalo u ledovcem hrazených jezer, jejichž množství činí v rámci všech ledovcových jezer v regionu pouhých 20,2 % (Ma a kol. 2021). U zbylých 49 zjištěných případů pocházel GLOF buď z jezera hrazeného morénou nebo z jezera s neznámým typem hráze.

Na rozdíl od způsobu přehrazení jezera je dostupnost informací ohledně způsobu selhání hráze výrazně nižší (viz Graf 32). Na základě velmi malého množství dat nelze spolehlivě vyhodnotit, k jakým způsobům selhání hráze ve vymezeném regionu povětšinou dochází. Vzhledem k tomu, že v regionech, kde také dominují GLOFs z ledovcem hrazených

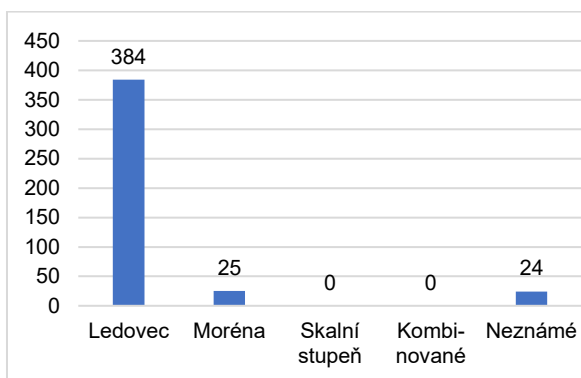
jezer dochází především k protrhávání hrází (např. kapitola 5.3.2), lze předpokládat podobný trend i v tomto pohoří.

Z celkových 24 známých způsobů selhání hráze, nastalo 6krát přelití hráze ledovcem hrazeného jezera a 18krát bylo zaznamenáno protržení hráze. Dvě protržení nastala u morénou hrazených jezer a zbylá u ledovcem hrazených jezer u kterých většinou došlo k vylití vody otevřením subglaciálního tunelu vedoucího pod ledovcovou hrází. Otevření subglaciálního tunelu v některých případech vedlo k následné destrukci hráze.

Graf 31: Způsob přehrazení jezera v regionu

Alpy

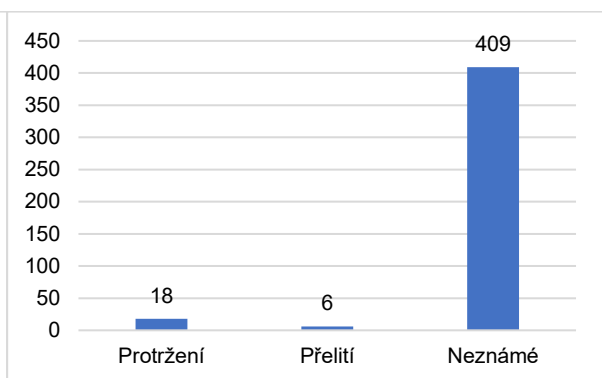
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 32: Způsob selhání hráze v regionu

Alpy

vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



### 5.3.3.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky

Od konce Malé doby ledové dochází v evropských Alpách k ústupu ledovců v důsledku tání, které bylo přerušeno pouze dvěma glaciálními postupy ve 20. a 70. letech minulého století. Mezi lety 1850 a 1980 se průměrná ztráta ledovcové hmoty zrychlila sedmkrát (Paul a kol. 2007) a alpské ledovce ztratily až 1/3 své rozlohy (Viani a kol. 2016). V letech 1850–2000 činila tato ztráta až 50 % (Emmer 2017). Od 80. let je ústup ledovců až do současnosti nepřetržitý (Viani a kol. 2016). Mnohé z pozorovaných změn (např. zvyšující se počet skalních výchozů, tvorba proglaciálních jezer či snižování albeda) vedou k pozitivní zpětné vazbě neustále urychlující tání ledovců. Z toho důvodu je velmi nepravděpodobné, že by se jejich ústup v budoucnu zastavil (Paul a kol. 2007). Oteplování klimatu způsobuje kromě tání ledovců také navyšování počtu a rozlohy ledovcových jezer (Ma a kol. 2021).

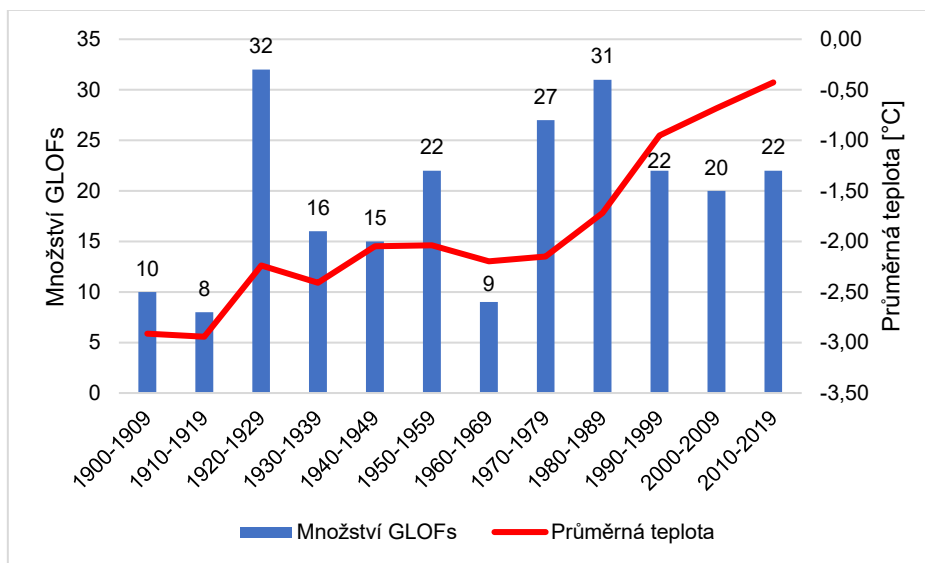
V Grafu 33 je porovnávána četnost GLOFs s průměrnou teplotou naměřenou na stanici *Saentis* v nadmořské výšce 2502 metrů (Meteoblue 2023). Podle výsledků zobrazených v grafu bylo zaznamenáno nejméně GLOFs mezi lety 1910–1919. Naopak čtyřnásobně více GLOFs nastalo v následujícím desetiletí (mezi lety 1920–1929), kdy byl jejich výskyt největší za celé sledované období.

V regionu Alpy dochází v průběhu sledovaných let k nepravidelně rostoucí četnosti GLOFs, která je v jednotlivých desetiletích nerovnoměrně rozložena. Četnost GLOFs narůstá

v průběhu let relativně pomalu, zároveň teplota v regionu vykazuje vysokou korelaci s rostoucí průměrnou globální teplotou (viz Tabulka 13).

Poslední zaznamenaný GLOF ve sledované oblasti pochází ze dne 24.08.2019. Následující ledovcové povodně, ke kterým mohlo dojít v letech 2020–2022, nebyly do databáze zahrnuty.

Graf 33: Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Alpy  
vlastní zpracování (NASA 2019; Veh a kol. 2022)



### 5.3.3.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce

V pohoří Alpy dochází podle Grafu 34 k nejvyšší intenzitě GLOFs v měsících červen–září. Naopak mnohem nižší počet případů GLOFs připadá na období říjen–květen. Graf 35 zobrazuje klima v oblasti vrcholu Furkastock, nacházejícího se ve švýcarských Alpách, ve výšce 2664 m n. m. Podle klimadiagramu dochází k největší intenzitě srážek v měsících červen–srpen, což jsou zároveň měsíce s nejvyššími průměrnými denními teplotními maximy. Rozdíl v množství GLOFs je mezi měsíci s kladnou průměrnou denní teplotou a zápornou průměrnou denní teplotou velmi výrazný.

Alpy leží mezi mírnými a subtropickými zeměpisnými šířkami a tvoří hranici mezi mírným přechodným podnebím střední Evropy a středomořským podnebím subtropické jižní Evropy (Ma a kol. 2021). Klima v Alpách je ovlivňováno vlhkým vzduchem od Atlantského oceánu ze západu, teplým středomořským vzduchem od jihu, studeným polárním vzduchem ze severu a kontinentálním vzduchem od východu (Wanner a kol. 1997).

V jižní části pohoří se nachází mnohem méně ledovců než v severní části zejména kvůli vyšší intenzitě slunečního záření a jižní expozici svahů (Williams a Ferrigno 1993). Oblast je domovem více než 1 000 ledovců o celkové ploše 3 600 km<sup>2</sup>. Tyto ledovce se povětšinou

rychle ztenčují a značná část ledovcové tající vody tak nepřetržitě přispívá k rozvoji ledovcových jezer (Paul a kol. 2020).

Vrcholové oblasti jsou chladné po celý rok a průměrná roční teplota v nadmořské výšce 2000 m je 0 °C. Roční srážky ve stejné výšce dosahují 1200–2000 mm (Frei a kol. 2003). V okrajových částech pohoří se srážky výrazně liší od srážek v centrální části Alp. K nejvyšším ročním srážkám dochází v nadmořské výšce 3 000 m, kde jejich roční úhrn přesahuje 2 500 mm (Ács a kol. 2018).

Klima v Alpách je také ovlivňováno Severoatlantickou oscilací. Hurrell (1995) zjistil, že když je index Severoatlantické oscilace vysoký, alpské klima má tendenci reagovat podprůměrnými srážkami a nadprůměrnými teplotami.

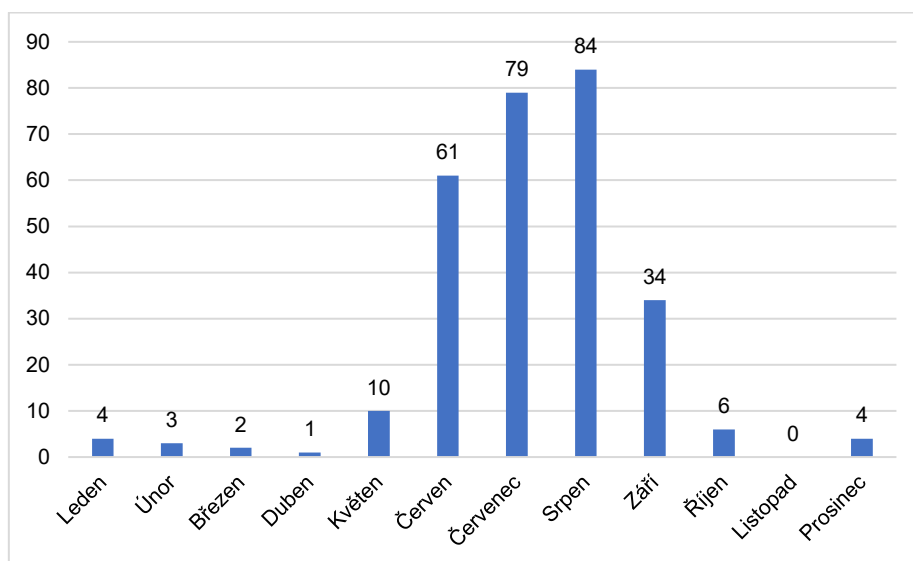
Oteplování klimatu v Alpách a s ním související tání permafrostu a ústup ledovců (Chiarle a kol. 2021) přispívá ke snižování stability horských svahů, což potvrzuje postupný nárůst případů středně velkých až velkých sesuvů ve vysokých nadmořských výškách za poslední století (Viani a kol. 2020). Zejména intenzivní déšť, rychlé tání sněhu nebo ledu či jeho cyklické tání a zamrzání patří mezi běžné příčiny narušování stability svahů a následných sesuvů (Pratt a kol. 2019).

Sesuvy v Alpách, jako jeden z potenciálních spouštěčů GLOFs (Deline a kol. 2015), způsobily vážné škody v obydlených horských oblastech, a to především ve švýcarských Alpách. Toky transportují v Alpách obecně vyšší absolutní množství hrubozrnného sedimentu, než je tomu například v Andách nebo Himálajích, kde ledovcové povodně oproti Alpské oblasti často transportují mnohem větší objem vody (Chiarle a kol. 2021).

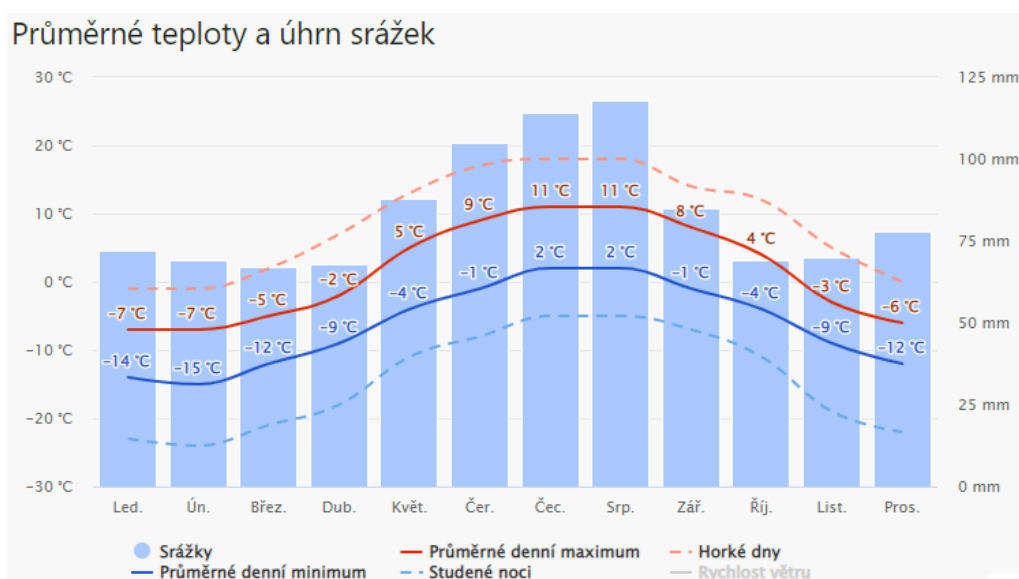
Region je domovem zhruba 15 milionů lidí, z nichž většina žije v údolích ohraničených strmými svahy. Zároveň oblast patří mezi nejnavštěvovanější na světě, přičemž každý rok navštíví Alpy zhruba 60–80 milionů turistů. Rostoucí populace a cestovní ruch může v kombinaci s rostoucím množstvím GLOFs stále více vystavovat obyvatele a návštěvníky přírodním rizikům (Agrawala 2007).



Graf 34: Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Alpy  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 35: Klimadiagram vrcholu Furkastock ve švýcarských Alpách ve výšce 2664 m n. m. (Meteoblue 2023)



### 5.3.3.4 Četnost opakování GLOFs

Navzdory tomu, že se v Alpách nacházejí povětšinou jezera, která nejsou hrazená ledovcem, byly GLOFs zjištěny zejména u ledovcem hrazených jezer (viz Tab. 7). U nadpoloviční většiny ledovcem hrazených jezer došlo k opakovanému selhání hráze. Naopak u morénou hrazených jezer, je opakované selhání hráze vzácnější. V průběhu celého sledovaného období došlo u čtyř jezer ke změně definovaného typu jezerní hráze. V jednom případě byla původně ledovcová hráz nahrazena morénovou hrází. Ve dvou případech došlo k opačnému postupu, kdy byla původně morénová hráz nahrazena ledovcovou hrází a v posledním případě byl neznámý typ jezerní hráze později také nahrazen ledovcovou hrází.



K největšímu množství opakovaného selhání hráze dochází u jezera Gornersees nacházejícího se ve švýcarských Alpách. V průběhu celého sledovaného období došlo u jezera ke GLOF v roce 1900, 1944 a následně mezi lety 1951–2015, kdy hráz selhávala každoročně. Celkem se tak hráz protrhla 67krát. Dále jsou v oblasti tři jezera, u kterých došlo k opakovanému selhání hráze 51krát, 39krát a 27krát.

Tab. 7: Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Alpy  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Typ přehrazení jezera	1	2–10	> 10
Ledovec	35	36	5
Moréna	12	6	0
Skalní stupeň	0	0	0
Kombinované	0	0	0
Neznámé	4	4	0
Celkem	51	46	5

### 5.3.3.5 Shrnutí

Ve sledovaném regionu bylo nejvíce GLOFs zaznamenáno u ledovcem hrazených jezer, u kterých časté opakování selhání hrází výrazně přispělo do celkového množství zaznamenaných ledovcových povodní. V menším množství se zde vyskytují GLOFs pocházející jak z morénou hrazených jezer, tak jezer s neznámým typem hráze. Způsob selhání hráze, který v oblasti převládá nelze z důvodu malé dostupnosti tohoto typu dat určit. Nejpravděpodobněji však v souvislosti s GLOFs dochází převážně k protržení hráze.

V jednotlivých desetiletích mezi lety 1900–2019 dochází k nerovnoměrnému rozložení množství GLOFs, kdy jejich četnost v čase pouze mírně narůstá. K nejvyššímu výskytu GLOFs dochází v průběhu roku během měsíců, kdy je nejvyšší jak intenzita srážek, tak průměrné denní teploty.

## 5.4 Asie

### 5.4.1 Kavkaz

Tato kapitola se zabývá výskytem GLOFs v pohoří Kavkaz. V rámci celého pohoří bylo zaznamenáno pouze 17 GLOFs (viz Obr. 10) pocházejících ze 7 jezer, která se všechna nacházejí na území Velkého Kavkazu ve výškách 2588–3281 m n. m. U zmíněných jezer byl typ hráze v okamžiku jeho posledního selhání v jednom případě hrazený morénou, v jednom případě hrazený neznámým materiálem a v pěti případech hrazený ledovcem. K jedenácti GLOFs došlo v západní části Velkého Kavkazu a pouze k šesti ve východní části, u kterých se vždy jednalo o odtok vody subglaciálním kanálem z jednoho englaciálního jezera. U tohoto jezera zároveň došlo k nejčastějšímu opakovanému selhání hráze v rámci celé sledované

oblasti. Ke vzniku ledovcových povodní zde dochází pouze výjimečně a v malém množství. Z toho důvodu není analyzovaný region podrobněji charakterizován (podobně jako v kapitole 5.5.1).

Celkem 11 zaznamenaných GLOFs pocházelo z ledovcem hrazených jezer, 5 GLOFs z morénou hrazených jezer a u jednoho jezera byl typ hráze neznámý. Z hlediska způsobu selhání hráze došlo v jedenácti případech k protržení hráze a v pěti případech k přelití hráze. Pouze v jednom případě byl způsob selhání hráze neznámý.

K šesti GLOFs došlo v letech 1970–1979. Jedná se tak o desetiletí s jejich nejčastějším výskytem. V rámci jednoho roku nastala ledovcová povodeň nejčastěji během měsíců červenec a srpen, což je způsobeno zvýšenou intenzitou tání v daném období (Tashilova a kol. 2019). K nejstaršímu zaznamenanému GLOF došlo dne 02.08.1909 z bezejmenného jezera s neznámým typem hráze a k nejnovějšímu GLOF z ledovcem hrazeného jezera Bashkara dne 01.09.2017. Za celé sledované období došlo u dvou ledovcových jezer ke změně typu hráze z morénové na ledovcovou. Množství případů GLOFs je v čase náhodné a jejich četnost nevykazuje do současnosti žádnou rostoucí tendenci.

Obr. 10: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Kavkaz (Veh a kol. 2022)



#### 5.4.2 Ťan-Šan

Tato kapitola se zabývá analýzou GLOFs, které se odehrály v pohoří Ťan-Šan. Na Obrázku 11 je zobrazena poloha 187 ledovcových povodní z celkových 195 zaznamenaných. 8 Případů GLOFs na mapě uvedeno není, jelikož u nich nebylo zjištěno, z jakých jezer pochází. K největšímu množství zdokumentovaných GLOFs došlo v rámci tohoto pohoří poblíž jezera Issyk-kul v severním a jihovýchodním směru od něj. K nejstarší zaznamenané ledovcové povodni došlo v tomto regionu roku 1902 u jezera Merzbacher hrazeného ledovcem Inylček.

V databázi byla zaznamenána jak ledovcem hrazená jezera ve výškách 2301–3745 m n. m., tak morénou hrazená jezera ve výškách 2419–4388 m n. m. V rámci sledované oblasti se 36 zaznamenaných jezer z celkových 43 nachází v nadmořských výškách 3200–3900 m n. m.

Obr. 11: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Ťan-Šan (Veh a kol. 2022)



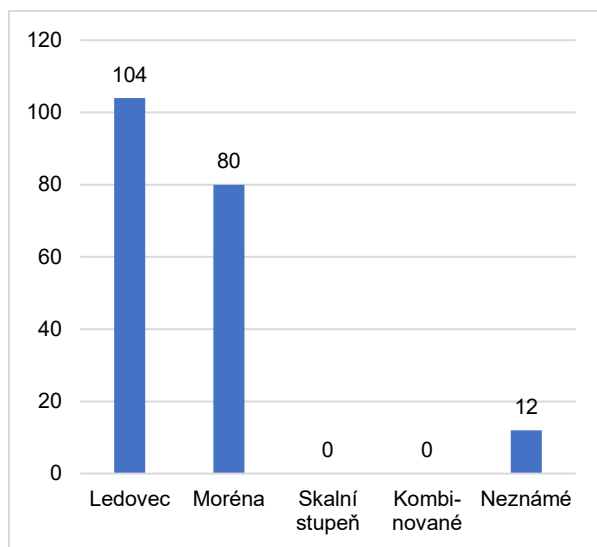
#### 5.4.2.1 Jezerní hráze

Ve sledované oblasti dochází na základě výsledků uvedených v Grafu 36 k vysokému výskytu ledovcových povodní jak z ledovcem hrazených jezer, tak z morénou hrazených jezer. Dostupnost informací o typu jezerní hráze v okamžiku jejího narušení je v této oblasti vysoká a nachází se zde tak pouze 11 případů, kdy byl způsob přehrazení jezera neznámý.

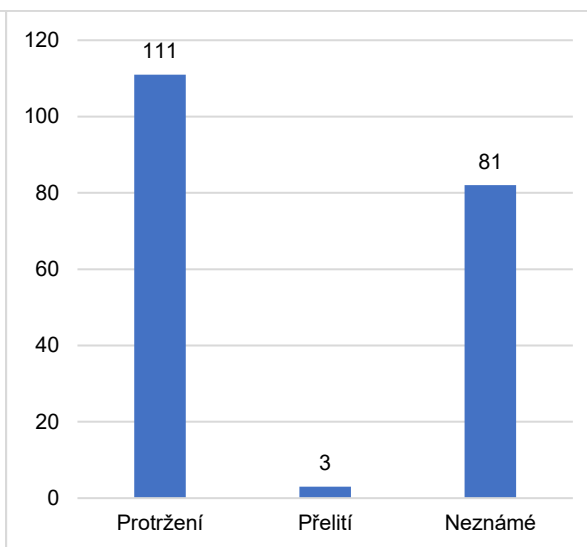
V oblasti dominují zejména případy, kdy v okamžiku vzniku GLOF nastalo protržení jezerní hráze (viz Graf 37). 92 těchto případů proběhlo u ledovcem hrazených jezer, kdy u šestnácti z nich došlo k otevření subglaciálního tunelu vedoucího pod ledovcovou hrází. V ostatních případech se vždy jednalo o vznik GLOF prostřednictvím okamžité destrukce hráze. Protržení morénové hráze bylo zaznamenáno pouze 18krát, kdy 4krát došlo k destrukci hráze a 14krát k odtoku vody pod hrází. Pouze v jednom případě není typ hráze v okamžiku jejího protržení známý. V tomto pohoří bylo jenom ve třech případech zaznamenáno přelití hráze, ke kterému vždy došlo u morénou hrazených jezer.

Ve sledovaném regionu je známá zhruba polovina způsobů selhání hráze v okamžiku vzniku GLOF. Nejmenší dostupnost informací je u morénou hrazených jezer, u kterých lze pomocí dostupných dat pouze předpokládat, že zde bude dominovat narušení hráze v podobě odtoku vody pod hrází.

Graf 36: Způsob přehrazení jezera v regionu  
 Ťan-Šan  
 vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 37: Způsob selhání hráze v regionu  
 Ťan-Šan  
 vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



#### 5.4.2.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky

Během posledních několika desetiletí dochází v oblasti k významnému ústupu ledovců a k související ztrátě ledovcové hmoty v důsledku oteplování (Bolch 2015). Například rychlost ústupu ledovce Petrov byla ve 2. polovině 20. století trojnásobně vyšší, než tomu bylo v 1. polovině 20. století (Janský a kol. 2009). Záznamy meteorologických stanic naznačují, že mezi lety 1940–1991 docházelo ke každoročnímu nárůstu jak průměrné teploty o 0,01 °C, tak průměrných srážek o 1,2 mm (Giese a kol. 2007). Od 2. poloviny minulého století vytváří v regionu stále teplejší a vlhčí klima příznivější podmínky pro plošnou expanzi zejména malých až středně velkých ledovcových jezer (< 0,6 km<sup>2</sup>). Celková plocha ledovcových jezer se mezi lety 1990–2010 zvýšila přibližně o 16,7 % a počet jezer se zvýšil o 22,5 %. V současnosti se jezera nacházejí převážně ve střední a východní části regionu, zatímco nejméně jezer bylo detekováno v západní části (Wang a kol. 2013).

V roce 2010 bylo týmem Wang a kol. (2013) v pohoří Ťan-Šan objeveno 1667 ledovcových jezer s celkovou rozlohou přibližně 96,5 km<sup>2</sup>. Z uvedeného množství ledovcových jezer bylo zhruba 80 % hrazeno morénou nebo skalním stupněm a naopak 20 % hrazeno ledovcem (z toho 2 % byla jezera supraglaciální).

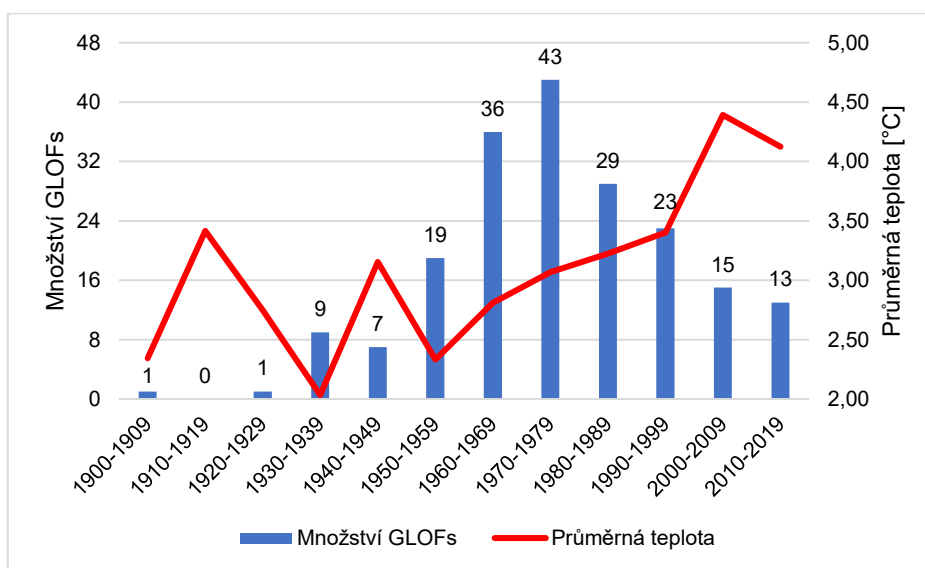
V Grafu 38 je porovnávána četnost GLOFs s průměrnou teplotou naměřenou na stanici Naryn v nadmořské výšce 2041 metrů (Meteoblue 2023). Podle hodnot uvedených v grafu lze zpozorovat postupnou narůstající četnost GLOFs mezi lety 1920–1979, kdy jejich množství bylo v desetiletí 1970–1979 nejvyšší za celé zkoumané období. Od 80. let dochází k postupnému poklesu množství GLOFs, který přetrvává do současnosti. Poslední GLOF byl v této oblasti zaznamenán v roce 2019.

Pokles četnosti GLOFs od 80. let mohl být způsoben neustálým ústupem až zánikem ledovců. Díky tomu může u ledovcových jezer docházet k omezení zdrojů vodnosti vedoucí k poklesu pravděpodobnosti vzniku GLOF (Singh a kol. 2011; Emmer a kol. 2016). Dalším důvodem klesajícího množství GLOFs v regionu může být zpevňování hrází člověkem u potenciálně nebezpečných jezer.

Potenciálně nebezpečných jezer se v pohoří až do současnosti nachází stále velké množství. Například Bolch a kol. (2011) zjistili, že v roce 2007 hrozilo u 47 ze 132 pozorovaných jezer v pohořích Zailijskij a Kungej Alatau vysoké riziko protržení hráze, které by mohlo následnou záplavou poškodit infrastrukturu či ohrozit místní obyvatelstvo. GLOFs a bahnotoky jsou v pohoří významnou přírodní hrozbou, přičemž jejich výskyt je v současnosti podporován tvorbou nových ledovcových jezer a destabilizací morén a svahů kvůli oteplování klimatu (Zaginaev a kol. 2019). Například ve 20. století bylo zhruba 11 % bahnotoků s katastrofickými následky vyvoláno ledovcovými povodněmi (Yegorov 2007). V regionu dochází k častým svahovým pohybům a k souvisejícím lavinám či sesuvům půdy (Passmore a kol. 2008), které mohou zapříčinit GLOF (Emmer a kol. 2014).

Jelikož se v regionu stále vyskytují nebezpečná jezera (Bolch a kol. 2011) a množství ledovcových jezer v důsledku oteplování narůstá (Wang a kol. 2013), lze předpokládat i narůstající množství GLOFs od 80. let. Na neustále klesající tendenci v množství GLOFs od 80. let se může podílet horší dostupnost dat po rozpadu Sovětského svazu až do počátku 21. století, kdy začíná být oblast lépe pozorována zahraničními týmy (Falátková 2014), postupné zpevňování hrází člověkem či zánik ledovců zásobující potenciálně nebezpečná jezera vodou.

Graf 38: Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Ťan-Šan vlastní zpracování (NASA 2019; Veh a kol. 2022)



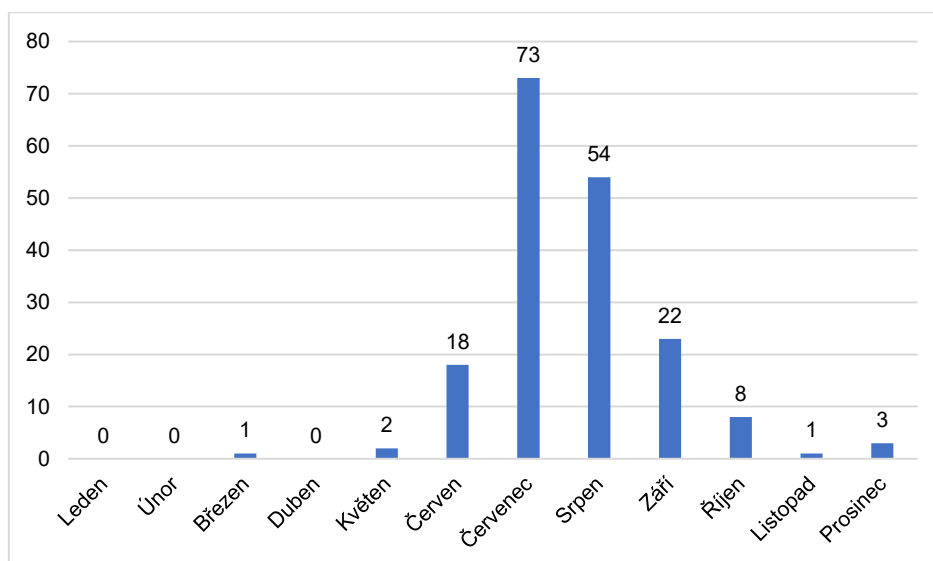
### 5.4.2.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce

V oblasti střední Asie je mírné klima kontinentálního typu, které se vyznačuje poměrně vysokými rozdíly teplot vzduchu během dne i v průběhu roku (viz Graf 40). Vlhkost je do tohoto regionu přinášena ze západu z oblasti Atlantiku a Středozevního moře (Aizen 1994). Rozmanitost klimatických charakteristik je v pohoří Ťan-Šan převážně řízena atmosférickými cirkulacemi a srážkovými režimy (Aizen a kol. 1995). Západní oblast zkoumaného regionu bývá pod slabým vlivem jak sibiřské anticyklony, tak jihozápadní cyklonální cirkulace, která do oblasti přivádí teplý vlhký vzduch a zvyšuje úhrn srážek. Severní část regionu je především pod vlivem sibiřské anticyklony, která v zimě značně snižuje úhrn srážek. Naopak v období jara a léta přinášejí cyklony do severní části regionu srážky. Centrální Ťan-Šan blokuje svými vysokými hřebeny průchod vlhkých vzduchových hmot od Atlantského oceánu dále na východ a východní část regionu je tak nejsušší oblastí (Sorg a kol. 2012).

V regionu Ťan-Šan dochází k největšímu množství GLOFs v měsících červenec a srpen, naopak velmi nízký výskyt byl zjištěn pro měsíce listopad–květen (viz Graf 39). V Grafu 40 je uveden Klimadiagram pro oblast ledovce Kemenskiy v západním Ťan-Šanu ve výšce 3771 m n. m. Podle daného klimadiagramu jsou nejvyšší průměrná denní teplotní maxima v měsících červenec a srpen, zatímco nejnižší v měsících leden a únor. K nejvyššímu úhrnu srážek zde dochází v měsících květen–červenec.

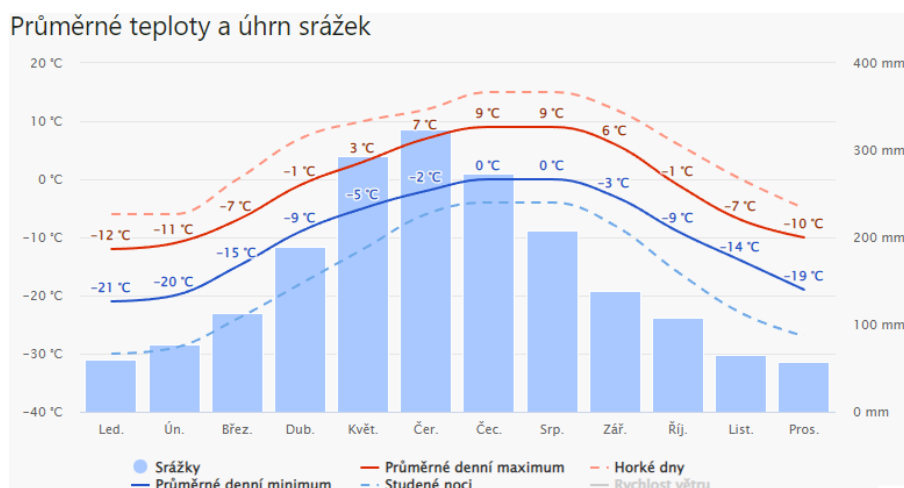
Na základě Grafů 39 a 40 dochází k nejčetnějšímu výskytu GLOFs v části roku s kladnými teplotami a vyšším úhrnem srážek, což naznačuje, že hlavní příčinou ledovcových povodní v oblasti mohou být svahové pohyby. Jelikož GLOFs v oblasti projevují závislost na teplotě, lze předpokládat, že k jejich zvýšenému výskytu v průběhu 60. a 70. let, začalo docházet v důsledku urychlování deglaciací (viz Kapitola 5.4.2.2).

Graf 39: Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Ťan-Šan  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)





Graf 40: Klimadiagram ledovce Kemenskiy v západním Ťan-Šanu ve výšce 3771 m n. m. (Meteoblue 2023)



#### 5.4.2.4 Četnost opakování GLOFs

Ledovcem hrazených jezer, které ve sledované oblasti zapříčinily GLOF bylo zaznamenáno pouze 8, zatímco jezer hrazených morénou 33. Dále se zde nachází 4 jezera, u kterých je typ hráze neznámý (viz Tab. 8). Od prvního zaznamenaného GLOF vzniklého roku 1902 došlo do současnosti ke změně typu hráze u tří sledovaných jezer, kdy se vždy jednalo vlivem deglaciace o změnu ledovcové hráze na hráz morénovou. Dále se zde vyskytují dvě jezera, u kterých byla hráz původně hrazená morénou a v okamžiku posledního zaznamenaného vylití vody byl typ hráze neznámý.

Jezero Merzbacher hrazené ledovcem Inylčok způsobilo v pohoří Ťan-Šan nejvyšší četnost opakovaných GLOFs. Zároveň se jedná o jediné zaznamenané jezero, nacházející se v jihovýchodním směru od jezera Issyk-kul. Jezero způsobilo mezi lety 1902–2015 celkem 89 opakovaných GLOFs, ke kterým docházelo téměř každoročně, kvůli periodickému přítoku tajícího ledu a sněhu (Shen a kol. 2009), přičemž v některých případech došlo k vylití vody dvakrát či třikrát do roka. U Jezera Merzbacher docházelo často buď k destrukci ledovcové hráze nebo k odtoku vody subglaciálním tunelem.

Největší výskyt GLOFs pocházejících z morénou hrazených jezer byl zaznamenán severně od jezera Issyk-kul. Kromě toho, že je jezer s tímto typem ve sledované oblasti nejvíce, dochází u nich zároveň i k často opakovaným GLOFs. Například u jednoho morénou hrazeného jezera došlo k opakovanému vylití vody během sledovaného období 14krát.

Tab. 8: Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Ťan-Šan  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Typ přehrazení jezera	1	2–10	> 10
Ledovec	6	1	1
Moréna	17	13	1
Skalní stupeň	0	0	0
Kombinované	0	0	0
Neznámé	1	3	0
Celkem	24	17	2

#### 5.4.2.5 Shrnutí

V oblasti bylo zaznamenáno nejvíce morénou hrazených jezer, u kterých často docházelo k opakovanému selhání hráze. V menším počtu se zde vyskytují ledovcem hrazená jezera, která v regionu způsobila nejvíce ledovcových povodní, zejména díky jezeru Merzbacher, u kterého docházelo k vylití vody téměř každoročně.

Většina zaznamenaných případů protržení hráze náleží ledovcem hrazeným jezerům. U morénou hrazených jezer je množství zaznamenaných způsobů selhání hráze malé. Na základě malého množství dostupných dat lze u těchto jezer pouze předpokládat, že vzhledem k jejich často opakovanému vylití vody dochází buď k přelití hráze nebo k odtoku vody pod hrázi.

Mezi lety 1900–1979 docházelo k postupnému nárůstu případů GLOFs, které mohou být v tomto regionu zapříčiněny zejména svahovými pohyby. Rostoucí výskyt GLOFs byl ve zmíněném období pravděpodobně způsoben nárůstem deglaciace, která se urychlila zhruba od 2. poloviny 20. století (Wang a kol. 2013). Vlivem deglaciace došlo od roku 1902 do současnosti u tří jezer ke změně typu jezerní hráze z ledovcové na morénovou. V průběhu celého sledovaného období vzniká nejvíce GLOFs zejména v letních měsících, přičemž množství záznamů ohledně jejich výskytu začalo od 80. let postupně klesat. K poklesu množství zdokumentovaných GLOFs od 80. let může docházet pokračující deglaciací, zpevnováním hrází člověkem nebo menším množstvím dostupných dat.

#### 5.4.3 Centrální Asie I (západ)

V této kapitole jsou analyzovány GLOFs, ke kterým došlo v pohořích Hindúkuš, Karákóram a v oblastech západních a středních Himálají západně od řeky Gandak (viz Obr. 12). GLOFs bylo od počátku pozorování zaznamenáno celkem 273 z nichž 231 pochází z 56 ledovcových jezer. U zbylých 42 případů ledovcových povodní nebylo známo, z jakého jezera pochází a z toho důvodu nejsou zobrazeny v Obr. 12. Nejvíce GLOFs bylo zdokumentováno v pohoří Karákóram, kde se také nachází nejstarší zaznamenaná ledovcová povodeň, ke které došlo roku 1533 z bezejmenného jezera hrazeného ledovcem Kumdan.



V tomto regionu se vyskytují ledovcem hrazená jezera ve výškách 2500–5581 m n. m. a také morénou hrazená jezera ve výškách 2625–5689 m n. m. Většina analyzovaných ledovcových jezer je rovnoměrně rozmístěných ve výškách 2000–5000 m n. m.

Obr. 12: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Centrální Asie I (západ) (Veh a kol. 2022)

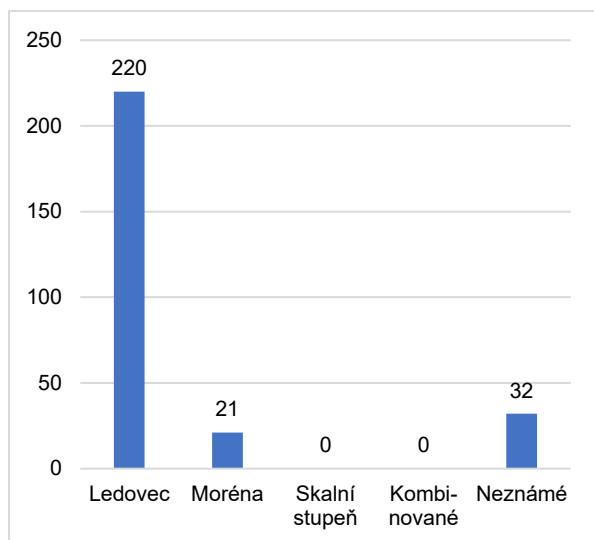


#### 5.4.3.1 Jezerní hráze

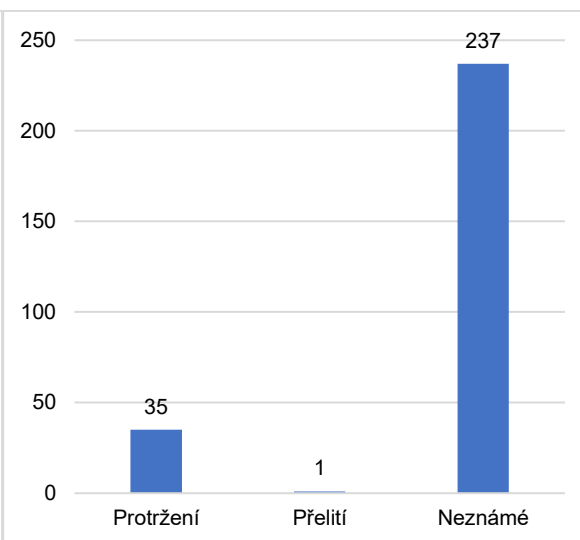
Na Grafu 41, který znázorňuje způsob přehrazení jezera v okamžiku kdy nastalo selhání hráze, lze spatřit vysoké množství zaznamenaných GLOFs pocházejících z ledovcem hrazených jezer. Dále v oblasti došlo k menšímu množství GLOFs pocházejících z morénou hrazených jezer a z jezer, kde byl typ hráze v okamžiku jejího selhání neznámý. Podle zmíněných výsledků je nejpravděpodobnější, že se v oblasti nacházejí převážně ledovcem hrazená jezera.

Povětšinou není v tomto regionu známý způsob selhání hráze v okamžiku vzniku GLOF (viz Graf 42). Jediné zaznamenané přelití hráze nastalo u ledovcem hrazeného jezera. Nicméně u ledovcem hrazených jezer dominuje v oblasti především protržení hráze, kdy se jedná buď o její náhlou destrukci nebo o odtok vody subglaciálním kanálem. U morénou hrazených jezer jsou známy pouze tři případy selhání hráze, kdy se dvakrát jednalo o okamžitou destrukci hráze a v jednom případě o odtok vody pod hrází. Obecně lze i na základě menšího množství dostupných dat předpokládat, že v oblasti dochází převážně k protrhávání hrází, a nikoliv k jejich přelití.

Graf 41: Způsob přehrazení jezera v regionu  
Centrální Asie I (západ)  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 42: Způsob selhání hráze v regionu  
Centrální Asie I (západ)  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



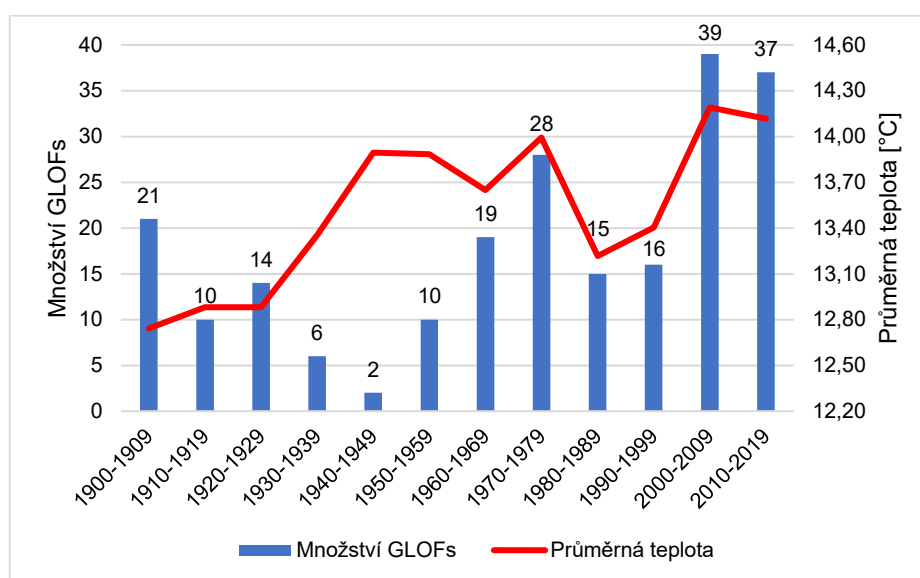
#### 5.4.3.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky

V Grafu 43 je porovnávána četnost GLOFs mezi lety 1900–2019 s průměrnou teplotou naměřenou na stanici *Srinagar* v nadmořské výšce 1587 metrů (Meteoblue 2023). I přesto, že je podle Grafu 43 četnost zaznamenaných GLOFs za jednotlivá desetiletí rozkolísaná, graf stále vykazuje v čase postupný nárůst ledovcových povodní. K nejvíce GLOFs došlo v letech 2000–2009 (39) a naopak k nejméně v letech 1940–1949 (2).

Karákóram, kde bylo zaznamenáno nejvíce GLOFs, patří mezi jedno z nejvíce zaledněných pohoří nacházející se mimo polární oblasti (Searle 1991). K tomuto pohoří bývá přiřazován termín „Karákóramská anomálie“, jelikož zde i přes rostoucí průměrnou globální teplotu dochází k příhodným podmínkám pro nárůst ledovcové hmoty (Bazai a kol. 2021). Rozsáhlé důkazy o expanzi ledovců zejména v pohoří Karákóram byly nalezeny na konci 90. let 20. století. Již od 60. let 20. století zde má významný dopad na kladnou hmotnostní bilanci ledovců například postupný nárůst srážek a mírný pokles letních teplot (Hewitt 2009). Podle Hewitt (2005) přispívá ke kladné hmotnostní bilanci také letní asijský monzun přinášející nový sníh do vyšších nadmořských výšek. Zhruba 2 třetiny nového sněhu napadne v pohoří Karákóram ve vysokých nadmořských výškách v průběhu zimy, což je způsobeno cyklony, které sem v tomto ročním období pronikají od západu (Palazzi a kol. 2015). Minora a kol. (2013) také tvrdí, že suť, která překrývá ledovce téměř v celém sledovaném regionu (Scherler a kol. 2011), má při dostatečné mocnosti tepelně izolační účinky a může tak téměř zastavit povrchovou ablací (Konrad a kol. 1999). Podle Kapnick a kol. (2014) může jedinečná sezónnost srážek v pohoří Karákóram přispívat ke zpomalení ústupu ledovců, na rozdíl od oblastí himálajských a středoasijských ledovců.

Díky kladné hmotnostní bilanci dochází k expanzi ledovců do nižších poloh a k rozšiřování či vzniku potenciálně nebezpečných ledovcových jezer. Od 90. let navíc došlo k urychlení této expanze, čímž lze předpokládat pokračující nárůst počtu ledovcových povodní i v budoucnu (Bazai a kol. 2021). Celkově bylo mezi lety 2020–2022 zaznamenáno 5 GLOFs, které se všechny odehrály právě v pohoří Karákóram, přičemž k poslednímu zaznamenanému GLOF došlo 08.06.2021.

Graf 43: Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Centrální Asie I (západ) vlastní zpracování (NASA 2019; Veh a kol. 2022)

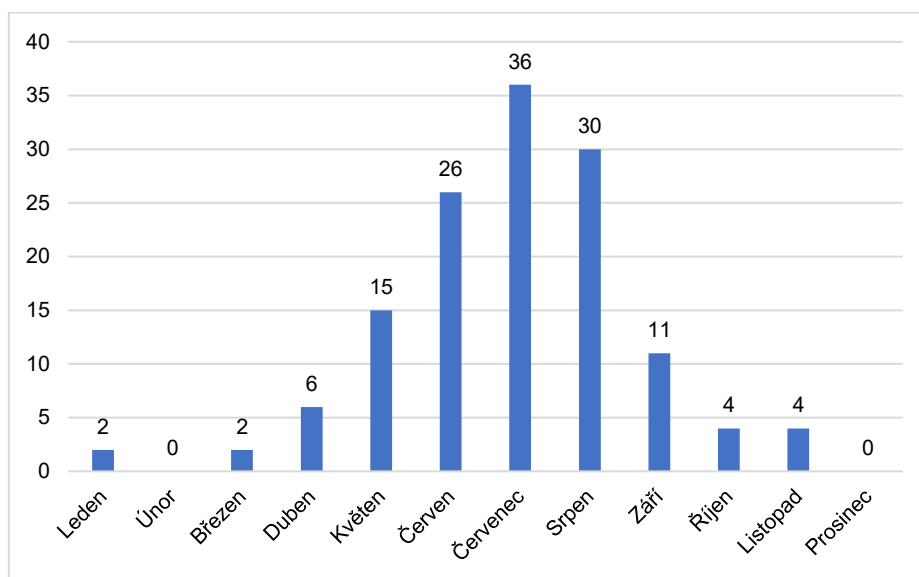


### 5.4.3.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce

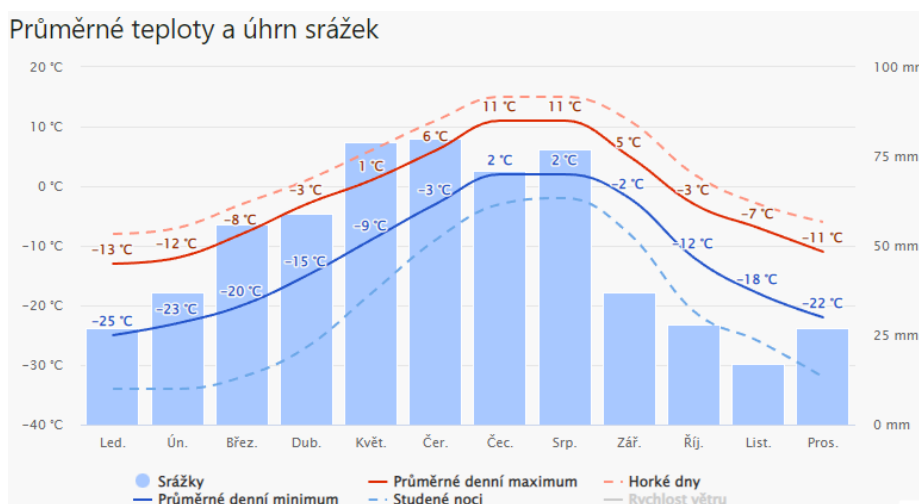
V regionu dochází k největšímu výskytu GLOFs v měsících červen–srpen, zatímco k nejmenšímu v měsících říjen–duben (viz Graf 44). Na Grafu 45 je zobrazený klimadiagram pro ledovec Braldu v pohoří Karákóram ve výšce 4486 m n. m. Dle tohoto klimadiagramu je v oblasti velká roční amplituda teploty s nejvyššími teplotami během měsíců červenec a srpen, naopak nejnižší teploty jsou v měsících prosinec–únor. K nejvyššímu úhrnu srážek zde dochází v měsících květen–srpen, přičemž úhrn srážek bývá po celý rok relativně nízký.

Četnost GLOFs jeví v tomto regionu vysokou korelaci s měsíčními teplotami, kdy k nejvyššímu výskytu dochází právě v nejteplejších měsících. Vyšší teploty společně s vyšším úhrnem srážek mohou v regionu zapříčinit zejména sesuvy vedoucí k selhání jezerní hráze a k následnému vzniku ledovcové povodně (Hack 2020).

Graf 44: Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Centrální Asie I (západ)  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 45: Klimadiagram ledovce Braidu v pohoří Karákóram ve výšce 4486 m n. m. (Meteoblue 2023)



#### 5.4.3.4 Četnost opakování GLOFs

Ve sledované oblasti bylo zaznamenáno nejvíce ledovcem hrazených jezer, u kterých docházelo velmi často k opakovanému selhání hrází (viz Tab. 9). Morénových jezer zde bylo objeveno 13, přičemž u všech selhala hráz pouze jednou, stejně jako u jezer s neznámým typem hráze, kterých bylo v oblasti zaznamenáno nejméně. Za celé období pozorování nedošlo u žádného z těchto jezer k jakékoliv změně typu jezerní hráze.

K nejvyššímu množství opakovaných GLOFs dochází u jezera Kyagar Lake hrazeného ledovcem Kyagar (43 případů) a u bezejmenného jezera hrazeného ledovcem Khurdopin (41 případů). Oba tyto ledovce vykazují kladnou hmotnostní bilanci a jsou zodpovědné přibližně za třetinu všech GLOFs, ke kterým došlo v pohoří Karákóram (Bazai a kol. 2021).

U těchto dvou jezer hrazených ledovcem došlo k prvnímu záznamu o ledovcové povodni v letech 1880 a 1882. Poslední záznam pochází v obou případech z roku 2019, což značí, že jsou jezera stále velmi nebezpečná a že u nich může v budoucnu ještě mnohokrát dojít k selhání hráze.

Tab. 9: Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Centrální Asie I (západ)  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Typ přehrazení jezera	1	2–10	> 10
Ledovec	15	19	4
Moréna	13	0	0
Skalní stupeň	0	0	0
Kombinované	0	0	0
Neznámé	5	0	0
Celkem	33	19	4

#### 5.4.3.5 Shrnutí

V regionu byl zaznamenán výskyt jak morénou hrazených jezer, tak ve větším množství ledovcem hrazených jezer, u kterých často dochází k opakovanému selhání hráze. Nejvíce se na množství opakovaných GLOFs podílejí ledovcová jezera přehrazená ledovci Kyagar a Khurdopin. Pouze u několika jezer byl zaznamenán způsob selhání hráze, nicméně lze předpokládat, že v oblasti dochází převážně k jejich protržení.

K nejvíce GLOFs dochází v měsících červen–srpen, během kterých byl zaznamenán i nejvyšší úhrn srážek. V průběhu zkoumaného období 1900–2022 byla zdokumentována rostoucí tendence četnosti ledovcových povodní, což je způsobeno především expanzí ledovců, díky které dochází k rozšiřování či tvorbě nových ledovcových jezer. Vzhledem k pokračující genezi ledovcových jezer lze ve sledované oblasti očekávat častější případy vzniku ledovcových povodní (Bazai a kol. 2021).

#### 5.4.4 Centrální Asie II (východ)

V této kapitole jsou zkoumány GLOFs, ke kterým došlo ve východních a středních Himálajích východně od řeky Gandak, v jihovýchodní části Tibetské náhorní plošiny a v pohoří Cheng-tuan-šan (viz Obr. 13). V průběhu celého zkoumaného období bylo zaznamenáno 97 GLOFs a 76 jezer, u kterých došlo k selhání hráze. V rámci zaznamenaných GLOFs nejsou 3 z nich zobrazeny na mapě, protože u nich nebylo zjištěno, z jakého jezera pochází. K největšímu množství ledovcových povodní došlo ve východních Himálajích, kde jich bylo zaznamenáno celkem 66. Zároveň se ve východních Himálajích nachází i nejstarší zaznamenaný GLOF z roku 1921 pocházející z morénou hrazeného jezera poblíž ledovce Lhonak.



V oblasti jsou analyzována ledovcem hrazená jezera ve výškách 4273–5213 m n. m., morénou hrazená jezera ve výškách 3290–5524 m n. m. a jedno hloubené jezero hrazené skalním stupněm ve výšce 4232 m n. m. Nejvíce ledovcových jezer se nachází ve výškách 4700–5300 m n. m., kde jich bylo zaznamenáno celkem 41.

Obr. 13: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Centrální Asie II (východ) (Veh a kol. 2022)



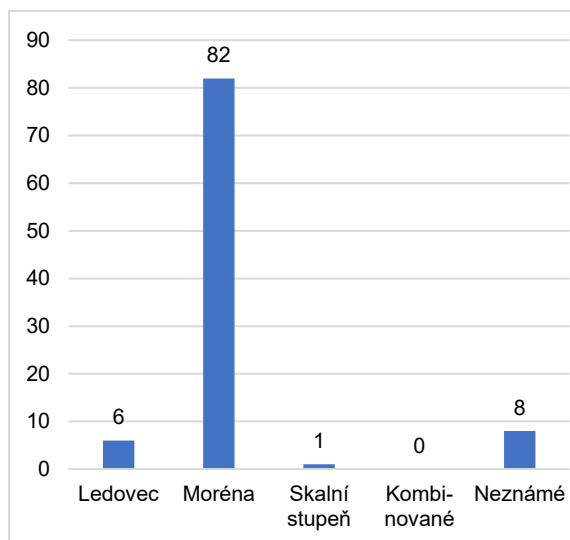
#### 5.4.4.1 Jezerní hráze

Podle Grafu 46 převládají v oblasti zejména GLOFs pocházející z morénou hrazených jezer. Pouze u velmi malého množství případů nastala ledovcová povodeň z jezer hrazených ledovcem, případně z jezera nacházejícího se za skalním stupněm. Dále zde bylo pouze 8 případů, kdy byl typ hráze v okamžiku jejího selhání neznámý. Na základě analyzovaných dat je patrné, že se ve sledované oblasti nacházejí především morénou hrazená jezera.

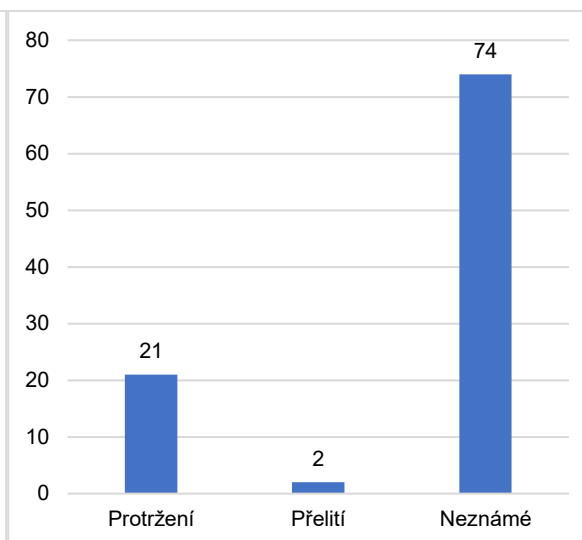
V regionu je způsob selhání hráze povětšinou neznámý (viz Graf 47). V rámci známých případů převládá u ledovcových jezer protržení hráze.

V jednom případě bylo zaznamenáno protržení hráze u ledovcem hrazeného jezera a v ostatních případech u morénou hrazených jezer, kdy se téměř vždy jednalo o její destrukci. Pouze ve čtyřech případech se u morénou hrazených jezer jednalo o vylití vody odtokovým kanálem pod hrází a ve dvou případech o přelití hráze. K nejvíce GLOFs v celé oblasti dochází pravděpodobně prostřednictvím destrukce hráze u morénou hrazených jezer.

Graf 46: Způsob přehrazení jezera v regionu  
Centrální Asie II (východ)  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 47: Způsob selhání hráze v regionu  
Centrální Asie II (východ)  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



#### 5.4.4.2 Četnost GLOFs za jednotlivé roky

V Grafu 48 je porovnávána četnost GLOFs s průměrnou teplotou naměřenou na stanici *Gauhati* v nadmořské výšce 54 metrů (Meteoblue 2023). Největší množství GLOFs bylo v oblasti zaznamenáno v letech 1990–1999 a naopak nejmenší v celé první polovině 20. století. Od počátku 50. let začalo docházet k postupnému nárůstu jednotlivých případů, který přetrvává dodnes.

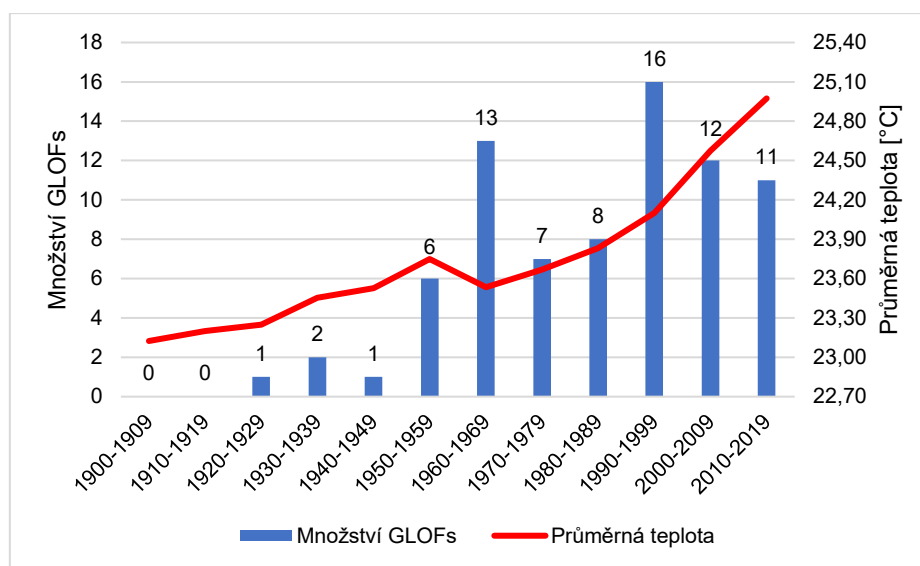
Ve velké části sledovaného regionu je zvláště patrný postupný nárůst globální teploty (Zafar a kol. 2016) a klesající úhrn srážek (Azam a kol. 2018), přispívající k urychlující deglaciaci (Wiltshire 2014). Podle Cogley (2016) docházelo v Himálajích každoročně mezi lety 1960–2010 k úbytku ledovcové hmoty v průměru o 0,4 %, přičemž zejména po roce 1995 byla míra úbytku nejvyšší (Azam a kol. 2018). Míra deglaciace je napříč Himálajemi nerovnoměrná a ledem přehrazená jezera se tak častěji vyskytují v jeho západní části včetně např. pohoří Karakóram, zatímco jezera přehrazená morénou dominují ve východních Himálajích (Richardson a Reynolds 2000).

V reakci na měnící se klima v himálajské oblasti (Mir a kol. 2018) a s ním související deglaciací (Wiltshire 2014) se v regionu postupně vytvořilo více než 5 000 ledovcových jezer, která jsou přehrazena potenciálně nestabilními morénami (Veh a kol. 2020), z nichž se některá v posledních desetiletích rychle zvětšovala (Nie a kol. 2017). Postupné zvětšování ledovcových jezer může podporovat častější a potenciálně ničivé ledovcové záplavy (Harrison a kol. 2018). Veh a kol. (2019) potvrzují, že v důsledku oteplování klimatu a urychlující deglaciace dochází v oblasti od počátku 20. století ke stále častějším případům GLOFs. V rámci všech analyzovaných oblastí mají v Himálajích stále častější GLOFs

na svědomí nejvíce lidských obětí a je jim tak věnováno stále více pozornosti (Veh a kol. 2020). Přesné množství nejen potenciálně nebezpečných jezer, ale také ledovců, které mohou časem tato jezera vytvořit, zůstává dodnes neznámý (Richardson a Reynolds 2000). Kromě tvorby nových ledovcových jezer dochází v oblasti zároveň i k jejich občasnému zániku v důsledku ztráty zdroje vodnosti spojeným především s ústupy a zániky ledovců (Nie a kol. 2017).

V letech 2020–2022 byly zdokumentovány celkem 2 GLOFs. Poslední GLOF zaznamenaný v databázi nastal ve sledovaném regionu 01.08.2020.

Graf 48: Množství GLOFs za jednotlivá desetiletí v závislosti na teplotě v regionu Centrální Asie II (východ) vlastní zpracování (NASA 2019; Veh a kol. 2022)



#### 5.4.4.3 Četnost GLOFs za jednotlivé měsíce

Úhrn srážek je v regionu podmíněn zejména asijským monzunem (Bookhagen a Burbank 2010), jehož vliv v Himálajích klesá od východu na západ. Jelikož Himálaje tvoří pro monzuny orografickou překážku, dochází k maximálnímu úhrnu srážek na jižních svazích (Shrestha a kol. 1999). U většiny ledovců ve východních a středních Himálajích dochází díky vysokým nadmořským výškám a vysokým monzunovým srážkám k maximální akumulaci sněhu v létě, která je však v tomto období narušována ablací (Ageta a Higuchi 1984). Díky zvýšené letní ablací a vlivu monzunových dešťů jsou v tomto období hladiny jezer nejvyšší (Richardson a Reynolds 2000).

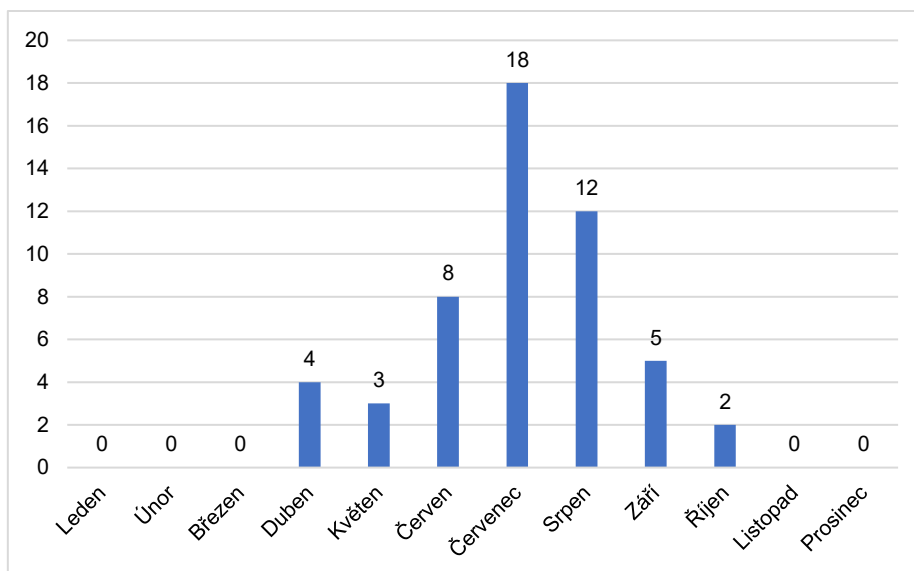
Asijský Monzun vyvolává ve sledovaném regionu především sesuvy půdy a laviny (Ballesteros-Cánovas a kol. 2018), které patří mezi hlavní příčiny způsobující protržení morénových hrází (Emmer a Vilímek 2013). Vysoký výskyt GLOFs v průběhu léta (viz Graf 49) tak potvrzuje, že sesuvy půdy a laviny mohou v oblasti patřit mezi jednu z hlavních příčin GLOFs. Richardson a Reynolds (2000) hledali v rámci své práce příčiny vzniku vybraných GLOFs (26), které nastaly v průběhu 20. století v měsících červen–říjen. Potvrdili, že



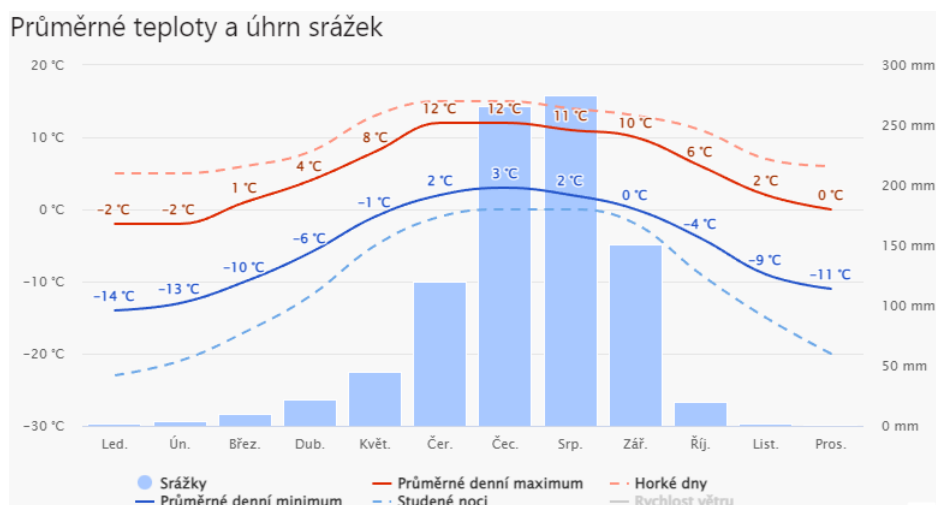
u nadpolovičního množství případů došlo, díky telení ledovců, k protržení morénové hráze prostřednictvím vlny vytvořené jednorázovým vstupem velkého objemu ledu a sněhu do jezera.

Na Grafu 50 je zobrazen klimadiagram východních Himálají ve výšce 4894 m n. m., na kterém lze zpozorovat nejvyšší teploty v měsících červen–září. Průměrná denní teplotní maxima se během těchto měsíců téměř nemění. Zároveň je v těchto měsících zaznamenán vysoký úhrn srážek, což je způsobeno zejména letním asijským monzunem přinášejícím vlhký vzduch od oceánu. K velmi malému úhrnu srážek dochází v měsících listopad–březen, což je způsobeno naopak zimním asijským monzunem přinášejícím suchý vzduch od pevniny (Lau a Li 1984).

Graf 49: Množství GLOFs za jednotlivé měsíce v regionu Centrální Asie II (východ) vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



Graf 50: Klimadiagram východních Himálají ve výšce 4894 m n. m. (Meteoblue 2023)



#### 5.4.4.4 Četnost opakování GLOFs

Ve sledovaném regionu dominují v rámci jezer, u kterých došlo k opakovanému selhání hráze, morénou hrazená jezera (viz Tab. 10), která se v oblasti vyskytují nejčastěji (Richardson a Reynolds 2000). Dále zde došlo ke GLOFs z jednoho jezera hrazeného skalním stupněm, dále z pěti jezer hrazených ledovcem a z pěti jezer s neznámým typem hráze. Za celé sledované období nebyl upozorován jediný případ změny typu jezerní hráze.

Ve sledované oblasti je u jezer četnost opakovaných selhání hrází nízká. Například u morénou hrazeného jezera Ayako, u kterého došlo k nejvíce případům GLOFs, selhala hráz pouze čtyřikrát. K selhání hráze u tohoto jezera docházelo mezi lety 1965–1970, přičemž způsob selhání hráze není ani v jednom případě známý. Obecně nízký výskyt opakovaných selhání hrází lze vysvětlit malým zastoupením ledovcem hrazených jezer, u kterých je frekvence opakování veliká. Naopak u morénou hrazených jezer dochází k opakovanému selhání hráze pouze výjimečně (viz Kapitola 6.6).

Tab. 10: Četnost opakování GLOFs z jednotlivých jezer v regionu Centrální Asie II (východ)  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Typ přehrazení jezera	1	2–10	> 10
Ledovec	4	1	0
Moréna	53	12	0
Skalní stupeň	1	0	0
Kombinované	0	0	0
Neznámé	4	1	0
Celkem	62	14	0

#### 5.4.4.5 Shrnutí

Ve sledované oblasti pochází GLOFs převážně z morénou hrazených jezer, kterých je v regionu nejvíce (Richardson a Reynolds 2000). Dále se zde v mnohem menší míře vyskytují případy GLOFs pocházející z ledovcem hrazeného jezera, případně z jezera nacházejícího se za skalním stupněm. V oblasti dochází k opakovanému selhání hráze pouze výjimečně, přičemž nejčastěji opakovaně selhali morénové hráze. Způsob selhání hráze je převážně neznámý, nicméně z dostupných dat je nejpravděpodobnější, že dochází povětšinou k jejich okamžitým destrukcím.

Během sledovaného období dochází k rostoucímu výskytu GLOFs, což je způsobeno oteplováním klimatu a urychlující dehlaciací (Veh a kol. 2019). Výskyt ledovcových povodní je během roku podmíněn převážně monzunou, vyvolávající zejména sesuvy půdy a laviny (Ballesteros-Cánovas a kol. 2018), kdy v období dešťů dochází ke GLOFs nejčastěji, a naopak v období sucha dochází ke GLOFs pouze výjimečně.

## 5.5 Oceánie

### 5.5.1 Nový Zéland

V této kapitole je zkoumán výskyt GLOFs na území Nového Zélandu. Ke vzniku ledovcových povodní dochází v oblasti pouze výjimečně a v malém množství. Z toho důvodu není analyzovaný region podrobně charakterizován (podobně jako v kapitole 5.4.1). Celkově zde bylo zaznamenáno 16 ledovcových povodní (viz Obr. 14) pocházejících ze tří jezer, která se všechna nacházejí v pohoří Jižní Alpy ve výškách 275–1005 m n. m. U dvou těchto jezer byla hráz v okamžiku posledního selhání hrazená ledovcem a v jednom případě hrazená morénou. K nejčtenějšímu selhání hráze došlo u bezejmenného englaciálního jezera překrytého ledovcem Franz Josef, kde hráz selhala celkem 13krát.

Na Obrázku 14 je znázorněno čtvrté jezero nacházející se na Severním ostrově, které je v databázi (Veh a kol. 2022) evidováno jako ledovcové jezero. Jedná se však o kráterové jezero nacházející se na sopce Ruapehu, která jezero zahradila vulkanickým materiálem při erupci roku 1945. Na Štědrý den roku 1953 se tato hráz zhroutil a došlo k vylití vody (Johnston a kol. 2000).

K zaznamenaným GLOFs došlo v deseti případech selháním ledovcové hráze, ve čtyřech případech selháním neznámého typu hráze a pouze ve dvou případech selháním morénové hráze. Z hlediska způsobu selhání hráze došlo v jednom případě k přelití hráze, v sedmi případech k protržení hráze a v osmi případech je způsob selhání hráze neznámý.

K nejčastějšímu výskytu GLOFs došlo v letech 1990–1999, kdy se odehrálo 8 takových případů. V rámci jednoho roku se vyskytují ledovcové povodně po celý rok, nejčastěji však v měsících prosinec–únor, kdy je v regionu nejtepleji. Celoroční výskyt GLOFs je nejvíce ovlivňován pravděpodobně vysokým celoročním úhrnem srážek.

K nejstaršímu zaznamenanému GLOF došlo mezi lety 1920–1940 z bezejmenného englaciálního jezera a k nejnovějšímu z bezejmenného supraglaciálního jezera dne 12.01.2007. Za celé sledované období nedošlo u žádného z ledovcových jezer ke změně typu hráze. Ke GLOFs zde kromě let 1990–1999 došlo jen velmi výjimečně a v čase jejich četnost nevykazuje rostoucí tendenci.

Obr. 14: Množství případů GLOFs ve vymezeném regionu Nový Zéland (Veh a kol. 2022)



## 6 POROVNÁNÍ REGIONŮ

### 6.1 Četnost ledovcových jezer a GLOFs

Více než 100 ledovcových jezer, u kterých došlo k vylití vody, bylo zpozorováno v regionech Střední Andy a Alpy, naopak nejméně takových jezer bylo zpozorováno v regionech Kavkaz a Nový Zéland (viz Tab. 11). V rámci největšího množství zjištěných GLOFs dominuje zejména region Aljaška. Kromě Aljašky patří mezi další regiony, s vysokým výskytem tohoto typu události, zejména Island a Alpy. U všech tří zmíněných oblastí často dochází k opakovanému selhání jezerních hrází a zároveň jsou v těchto oblastech častěji zastoupena jezera, u kterých došlo ke GLOF, hrazená ledovcem (viz Graf 51). Naopak nejmenší množství GLOFs bylo zpozorováno v oblastech Kavkaz a Nový Zéland, kde dochází k jejich výskytu pouze výjimečně.

Nejstarší zdokumentovaný GLOF se odehrál na Islandu roku 850. Island má ze všech regionů nejstarší zachovalé poznatky o GLOFs díky letopisům a středověkým dokumentům (Thorarinsson 1974) zmiňujícím například vulkanické erupce, které se v oblasti podílí na vzniku ledovcových povodní (Björnsson 1992). Mezi další oblasti s dochovanými staršími záznamy GLOFs patří zejména Alpy a Centrální Asie I (západ).

Podle uvedených výsledků spadají mezi nejlépe zdokumentované oblasti především Alpy. Z této oblasti je dostupné velké množství dat o ledovcových povodních, které se odehráli ještě před 20. stoletím (necelých 200 případů). Vysoká dostupnost dat o starších GLOFs je pravděpodobně zapříčiněna dlouhotrvajícím osídlením v téměř celém regionu (Agrawala 2007), kde pro obyvatelstvo již v průběhu 15. století představovaly GLOFs potenciální nebezpečí.

Mezi hůře zdokumentované oblasti lze zařadit hned několik zkoumaných regionů. V databázi je zahrnuto celkem 7 regionů, kde jsou zaznamenány nanejvýš 4 ledovcové povodně, které se odehráli před rokem 1900. To, že v takových regionech nejsou žádné starší události zdokumentovány, je způsobeno nejpravděpodobněji tím, že nebyl na zaznamenávání výskytu GLOFs kladen větší důraz, případně tím, že byly oblasti osídleny relativně pozdě. Nelze tak vyloučit, že by se GLOFs před rokem 1900 v daných oblastech nevyskytovaly vůbec či častěji, než tomu bylo například v Alpách.

V celé databázi bylo zaznamenáno 707 jezer u kterých nastala událost typu GLOF. Samotných GLOFs je v databázi zaznamenáno přibližně 4x více (celkem 2939), z toho bylo 2566 ledovcových povodní zdokumentováno až po roce 1900. Z výsledků tak vyplývá, že tyto události začínají v průběhu 20. století představovat rostoucí problém pro společnost a je jim věnováno stále více pozornosti. Zároveň je však vyšší dostupnost dat od počátku 20. století podmíněna novými metodami pro monitorování GLOFs a potenciálně nebezpečných ledovcových jezer. Mezi metody lze zařadit například porovnávání historických satelitních

snímků Landsat (Veh a kol. 2018), modelování záplav potenciálních GLOFs či jejich klasifikace (Khanal a kol. 2015).

Tab. 11: Četnost zaznamenaných jezer a GLOFs včetně data prvního záznamu ve sledovaných regionech vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Analyzovaný region	Počet ledovcových jezer	GLOFs celkem / GLOFs před r. 1900	Datum prvního záznamu GLOF
Aljaška	55	725 / 43	1810
Západní Kanada a USA	30	65 / 0	01.10.1926
Střední Andy	<b>153</b>	162 / 2	06.01.1725
Jižní Andy	64	175 / 4	02.01.1788
Island	83	591 / 74	<b>850</b>
Skandinávie	34	189 / 21	14.08.1741
Alpy	102	433 / <b>181</b>	1476
Kavkaz	7	17 / 0	02.08.1909
Ťan-Šan	43	196 / 0	21.08.1902
Centrální Asie I (západ)	56	273 / 48	1533
Centrální Asie II (východ)	76	97 / 0	1921
Nový Zéland	3	16 / 0	1920–1940
<b>Celkem</b>	<b>707</b>	<b>(2939 / 373)</b>	

## 6.2 Závislost ledovcových jezer na zeměpisné šířce

Při pohledu na Tabulku 12 dominují u nadpoloviční většiny analyzovaných regionů ledovcem hrazená jezera, u kterých došlo k události typu GLOF. Mezi oblastmi s vyšším než 90% zastoupením ledovcem hrazených jezer, u kterých došlo k vylití vody, patří Skandinávie, Island a Aljaška. Všechny tyto oblasti se na rozdíl od ostatních regionů nachází nejseverněji. Naopak mezi oblastmi, kde výrazně dominují jiná než ledovcem hrazená jezera, se zastoupením vyšším než 90 %, patří Centrální Asie II (východ) a Střední Andy, které se nacházejí nejbližší k rovníku.

Na základě četnosti jednotlivých typů ledovcových jezer u výše zmíněných regionů lze předpokládat, že míru jejich výskytu výrazně ovlivňuje zonalita klimatu. Nicméně u ostatních regionů je vliv zonality klimatu výrazně menší. Například v regionu Západní Kanada a USA vznikaly GLOFs převážně z jezer hrazených morénou (viz Kapitola 5.1.2.4), zatímco v jižněji se nacházejícím regionu Centrální Asie I (západ) byly případy vylití vody z jezera zaznamenávány především u ledovcem hrazených jezer. Z výsledků tak vyplývá, že zonalita klimatu ovlivňuje každý ze sledovaných regionů nerovnoměrně.

Nerovnoměrné rozložení jednotlivých typů ledovcových jezer v závislosti na zeměpisné šířce lze vysvětlit tím, že je každá oblast ovlivňována mnohými klimatickými faktory, působícími s různou intenzitou. Mezi nejzákladnější klimatické faktory ovlivňující sledované oblasti lze, kromě zeměpisné šířky, zařadit například vzdálenost od oceánu, nadmořskou výšku,

převládající směr větru, mořské proudy nebo převládající tlakové útvary (Meteorologia en Red 2023).

Například mezi regiony Centrální Asie I (západ) a Centrální Asie II (východ) je výrazný rozdíl v zastoupení jednotlivých typů ledovcových jezer, u kterých došlo ke GLOF, podmíněn kromě rozdílné kontinentality klimatu především asijským monzunem (Bookhagen a Burbank 2010). V regionu Centrální Asie II (východ), který více ovlivňuje jak oceánské klima, tak asijské monzuny se častěji vyskytují jezera hrazená morénou (viz Kapitola 5.4.4.4), zatímco v oblasti Centrální Asie I (západ) dominují jezera hrazená ledovcem (viz Kapitola 5.4.3.4).

Tab. 12: Četnost jednotlivých typů ledovcových jezer, v závislosti na zeměpisné šířce sledovaných regionů  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)

Region	Zeměpisná šířka ( $\pm 1^\circ$ )	Ledovcem hrazená jezera	Ledovcem nehrazená jezera
Skandinávie	60–70° s. z. š.	<b>32 (96,97 %)</b>	1 (3,03 %)
Island	63–66° s. z. š.	<b>53 (96,36 %)</b>	2 (3,64 %)
Aljaška	55–64° s. z. š.	<b>51 (94,44 %)</b>	3 (5,56 %)
Západní Kanada a USA	38–52° s. z. š.	5 (16,67 %)	25 (83,33 %)
Alpy	45–47° s. z. š.	76 (80,85 %)	18 (19,15 %)
Ťan-Šan	42–45° s. z. š.	8 (20,51 %)	31 (79,49 %)
Kavkaz	42–43° s. z. š.	5 (83,33 %)	1 (16,67 %)
Centrální Asie I (západ)	29–39° s. z. š.	38 (74,51 %)	13 (25,49 %)
Centrální Asie II (východ)	27–31° s. z. š.	5 (7,04 %)	<b>66 (92,96 %)</b>
Střední Andy	8–17° j. z. š.	2 (1,63 %)	<b>121 (98,37 %)</b>
Nový Zéland	43–45° j. z. š.	2 (66,66 %)	1 (33,34 %)
Jižní Andy	28–55° j. z. š.	19 (31,15 %)	42 (68,85 %)

### 6.3 Typy jezerních hrází a způsoby jejich selhání

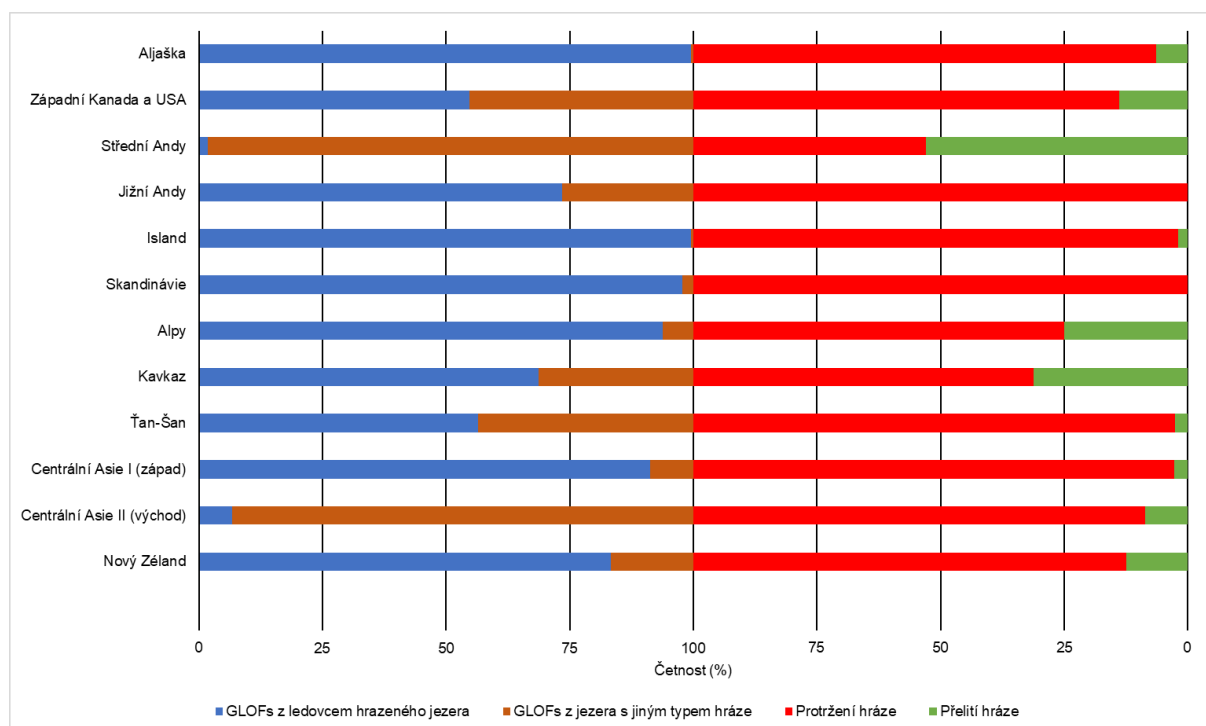
V levé části Grafu 51 lze spatřit, že u většiny regionů dochází k vylití vody převážně z ledovcem hrazených jezer. GLOFs pocházející z ledovcem hrazených jezer výrazně dominují v oblastech Aljaška, Island a Skandinávie, kde činí četnost zaznamenaných případů téměř 100 %. Zároveň ve všech třech zmíněných oblastech výrazně převažují případy, kdy se jezerní hráz v souvislosti s GLOF protrhla, což značí, že existuje určitá vazba mezi typem hrazení a způsobem vylití vody z ledovcového jezera. Mezi oblastmi, kde značně dominují GLOFs z jezer, která nejsou hrazena ledovcem, patří Střední Andy a Centrální Asie II (východ).

Podle dat uvedených v pravé části grafu bylo u většiny regionů alespoň 75 % všech zaznamenaných GLOFs vyvoláno protržením hráze. Mezi oblastmi, kde bylo protržení hráze v souvislosti s GLOF zaznamenáno nejčastěji patří zejména Aljaška, Jižní Andy, Island,

Skandinávie, Ťan-Šan a Centrální Asie I (západ). Naopak četnost zaznamenaných přelití hráze je ve všech oblastech výrazně nižší. K přelití hráze, v souvislosti se vznikem GLOF, dochází nejčastěji v regionu Střední Andy, kde je vysoká četnost takových případů zapříčiněna jak přeléváním skalních stupňů hradící jezera, tak přeléváním kombinovaných hrází (viz Kapitola 5.2.1.1).

Při porovnání výsledků uvedených v grafu jsou GLOFs pocházející z ledovcem hrazených jezer povětšinou zapříčiněny protržením jezerní hráze. K častému protržení hráze dochází i u jezer hrazených morénou. Například v regionu Centrální Asie II (východ), dochází nejčastěji k destrukci morénových hrází, které jsou v regionu nejčetnější (viz Kapitola 5.4.4.1). Přelévání hrází naopak dominuje u jezer s kombinovanou hrází a u jezer nacházejících se za skalním stupněm, které se vyskytují především v oblasti Střední Andy (viz Kapitola 5.2.1.1).

Graf 51: Typ přehrazení jezera a způsob selhání hráze v okamžiku GLOF ve sledovaných regionech  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



## 6.4 Změny v četnosti GLOFs za pozorované období 1900–2019

Ve všech analyzovaných regionech se míra výskytu GLOFs s časem mění (viz Tabulka 13). Z výsledků uvedených v tabulce je zřejmé, že u téměř všech regionů množství GLOFs v čase narůstá. Výjimkou jsou regiony Západní Kanada a USA a Ťan-Šan, kde se počet případů GLOFs snižuje. Takový pokles může být zapříčiněn například postupným ústupem až zánikem ledovců (Zoback a Grollimund 2001), které významně zásobují ledovcová jezera roztátým ledem a sněhem (Singh a kol. 2011). Dalším důvodem může být zpevňování hrází člověkem, což může vést k zamezení vylití vody z potenciálně nebezpečných jezer. K rozsáhlému



zpevnování hrází člověkem mohlo dojít především v oblasti Západní Kanada a USA, kde došlo k výraznému poklesu ledovcových povodní v letech 1990–1999 (viz Kapitola 5.1.2.2). Nerovnoměrný výskyt GLOFs byl mezi lety 1900–2019 zpozorován v regionech Kavkaz a Nový Zéland. V obou těchto oblastech dochází k ledovcovým povodním pouze výjimečně a vzhledem k malému množství dat nelze zpozorovat žádný trend v možném nárůstu, či poklesu jejich četnosti. Výsledným porovnáním analyzovaných regionů dochází celosvětově ke stále častějšímu výskytu událostí typu GLOF.

V rámci parametru **Počátek měření** došlo u pěti regionů k počátku měření souvislých dat o teplotě vzduchu až po roce 1900. Z toho důvodu, že zde nebylo oteplení vypočteno jako rozdíl mezi desetiletími 1900–1909 a 2010–2019, nelze zmíněné oblasti spolehlivě porovnávat s oblastmi, kde jsou data dostupná již od roku 1900.

Celosvětově došlo mezi desetiletími 1900–1909 a 2010–2019 k oteplení o 1,05 °C. U všech analyzovaných regionů dochází v rámci sledovaného časového období k oteplování, z toho pouze u třech z nich je v tabulce hodnota oteplení menší než zmíněných 1,05 °C. U regionu Jižní Andy činí hodnota oteplení 0,98 °C. Tato hodnota je ale výsledkem rozdílu teplot mezi desetiletími 1930–1939 a 2010–2019, proto je pravděpodobné, že i zde dochází k rychlejšímu oteplení, než kolik činí globální trend. Nejrychlejší oteplování je zaznamenáno v Alpách, kde se za sledované časové období oteplilo o 2,49 °C. K podobnému nárůstu může docházet i v regionu Kavkaz, kde se již mezi desetiletími 1940–1949 a 2010–2019 oteplilo o 2,12 °C.

Výsledky u Korelačního koeficientu ukazují, že je v jednotlivých oblastech závislost změny teploty vzduchu na změně globální teploty různá. Nejmenší hodnota korelačního koeficientu byla naměřena na Islandu, kde docházelo mezi lety 1950–1989 v rozporu s globální teplotou k souvislému ochlazení (viz Kapitola 5.3.1.2). Naopak velmi vysoká hodnota korelačního koeficientu byla naměřena v regionech Alpy a Centrální Asie II (východ). Ve všech regionech není hodnota Pearsonova korelačního koeficientu menší než 0,6. Z toho důvodu lze předpokládat, že díky pokračujícímu globálnímu oteplování bude zároveň docházet k oteplování ve všech sledovaných oblastech.

Tab. 13: Změny teplot vzduchu a četností GLOFs mezi lety 1900–2019 ve sledovaných regionech  
vlastní zpracování (EPI 2015; Veh a kol. 2022; NOAA 2023)

Analyzovaný region	Tendence v množství GLOFs	Počátek měření	Oteplení [°C]	Korelační koeficient
Aljaška	+	1920	1,61	0,90
Západní Kanada a USA	–	1900	0,85	0,78
Střední Andy	+	1950	1,33	0,83
Jižní Andy	+	1930	0,98	0,94
Island	+	1900	1,05	0,61
Skandinávie	+	1900	1,42	0,79
Alpy	+	1900	2,49	0,98
Kavkaz	+/-	1940	2,12	0,87
Ťan-Šan	–	1900	1,78	0,75
Centrální Asie I (západ)	+	1900	1,38	0,71
Centrální Asie II (východ)	+	1900	1,85	0,98
Nový Zéland	+/-	1910	1,17	0,76
Celosvětově	+	1900	1,05	1

## 6.5 Výskyt GLOFs v průběhu roku

### 6.5.1 Závislost výskytu GLOFs na teplotě a na srážkách

Ve většině regionů je výsledná kladná hodnota **Korelačního koeficientu teploty vzduchu** vysoká a rostoucí množství GLOFs tak koreluje s rostoucí teplotou vzduchu (viz Tab. 14). Regiony Kavkaz a Nový Zéland vykazují, v porovnání s ostatními oblastmi, nižší hodnotu **korelačního koeficientu teploty vzduchu**. Je pravděpodobné, že korelace díky malému množství zaznamenaných GLOFs nepřesně znázorňuje skutečnou míru závislosti. Vzhledem k tomu, že je korelace ve všech regionech, které mají roční amplitudu teploty vzduchu vyšší nebo rovnou 6 °C, vysoká, lze předpokládat vyšší korelaci i v oblastech Kavkaz a Nový Zéland.

Nejmenší závislost v množství GLOFs na teplotě vzduchu vykazuje region Střední Andy, kde je navíc hodnota korelace jako jediná záporná. Tato oblast se nachází nejbližší rovníku a roční amplituda průměrné maximální teploty vzduchu je tak 2 °C. Celoročně téměř neměnná teplota vzduchu má tak na rozložení GLOFs během roku zanedbatelný vliv. V oblasti došlo v květnu roku 1970 k zemětřesení (Lliboutry a kol. 1977), které vyvolalo 5 GLOFs. Tabulka tak v závorce uvádí hodnotu korelace bez zmíněných pěti případů. Podobně je na tom hodnota uvedená v závorce u parametru **Korelační koeficient srážek**.

. Na rozdíl od předchozího parametru je hodnota **Korelačního koeficientu srážek** velmi proměnlivá. U regionů, kde ke GLOFs dochází především v nejteplejší části roku, značí záporné hodnoty **Korelačního koeficientu srážek** největší úhrn srážek převážně v chladnějším ročním období. Naopak kladné hodnoty tohoto korelačního koeficientu vyznačují v takovém případě převažující úhrn srážek v teplejším ročním období.

V regionech, kde je četnost GLOFs podmíněna teplotou vzduchu a ke srážkám dochází převážně v teplejší části roku (tzn. hodnoty obou korelací jsou kladné a vysoké), dochází pravděpodobně k četným sesuvům, které se mohou podílet na vzniku ledovcových povodní. Příčinou vzniku sesuvů je právě kombinace vysokých teplot a intenzivních srážek (Emmer a kol. 2014). Mezi oblasti s příhodnými podmínkami pro vznik sesuvů tak lze zařadit Alpy, Ťan-Šan, Centrální Asie I (západ) a Centrální Asie II (východ).

Regionem, kde se svahové pohyby výrazně podílí na vzniku GLOFs jsou Střední Andy (Emmer a kol. 2014), nacházející se nejbližší rovníku. Vzhledem k celoročně kladnému průměrnému dennímu maximu ve výškách, kde ke GLOFs převážně dochází, je rozložení četnosti GLOFs během roku podmíněno především srážkami. Závislost na srážkách potvrzuje i hodnota **Korelačního koeficientu srážek**. V případě, že se do korelace nezahrne 5 GLOFs, které vznikly zemětřesením, činí korelace četnosti GLOFs se srážkami hodnotu 0,65.

Jelikož se ve Středních Andách, kde dochází ke GLOFs především z morénou hrazených jezer (viz Graf 51), výrazně podílí na vzniku GLOFs svahové pohyby (Emmer a kol. 2014), lze podobný trend pozorovat i v regionu Centrální Asie II (východ). Naopak v regionech Alpy, Ťan-Šan a Centrální Asie I (západ) se na vzniku GLOFs případné svahové pohyby podílí méně. Důvodem je převažující množství vzniklých GLOFs z ledovcem hrazených jezer (viz Graf 51). U tohoto typu jezer dochází především k opakovanému (viz Kapitola 6.6) protržení ledovcové hráze (viz Kapitola 6.3). K takovým událostem může docházet například v důsledku cyklického navyšování hydrostatického tlaku schopného narušit celistvost hráze (Whalley 1971; Anderson a kol. 2003).

Roční amplituda průměrné maximální teploty vzduchu je nejnižší u regionů Střední Andy a Jižní Andy. Nicméně hodnota korelace množství GLOFs s teplotou vzduchu je u daných oblastí výrazně odlišná. Vysoká korelace v Jižních Andách je výsledkem toho, že teploty vzduchu sahají v určité části roku po celý den pod bod mrazu. V chladné části roku jsou tak potenciální příčiny vzniku GLOFs utlumené. V teplejší části roku s kladnými denními teplotami se pravděpodobnost vzniku GLOFs zvyšuje. Důvodem může být například vyšší nestabilita svahů (Emmer a kol. 2014) nebo tání ledu a sněhu, zvyšující pravděpodobnost vzniku GLOF v důsledku plnění ledovcových jezer vodou (Jain a kol. 2012). Naopak u Středních And jsou průměrná denní teplotní maxima celoročně kladná, zatímco denní minima záporná. Opakované střídání kladných a záporných teplot podporuje v oblasti mrazové zvětrávání (Draebing a Krautblatter 2019) a svahy jsou tak náchylnější na vznik případných svahových pohybů. Díky celoročně relativně neměnným teplotám jsou GLOFs iniciovány až v období intenzivních srážek.

Tab. 14: Závislost výskytu GLOFs na teplotě a na srážkách  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022; Meteoblue 2023)

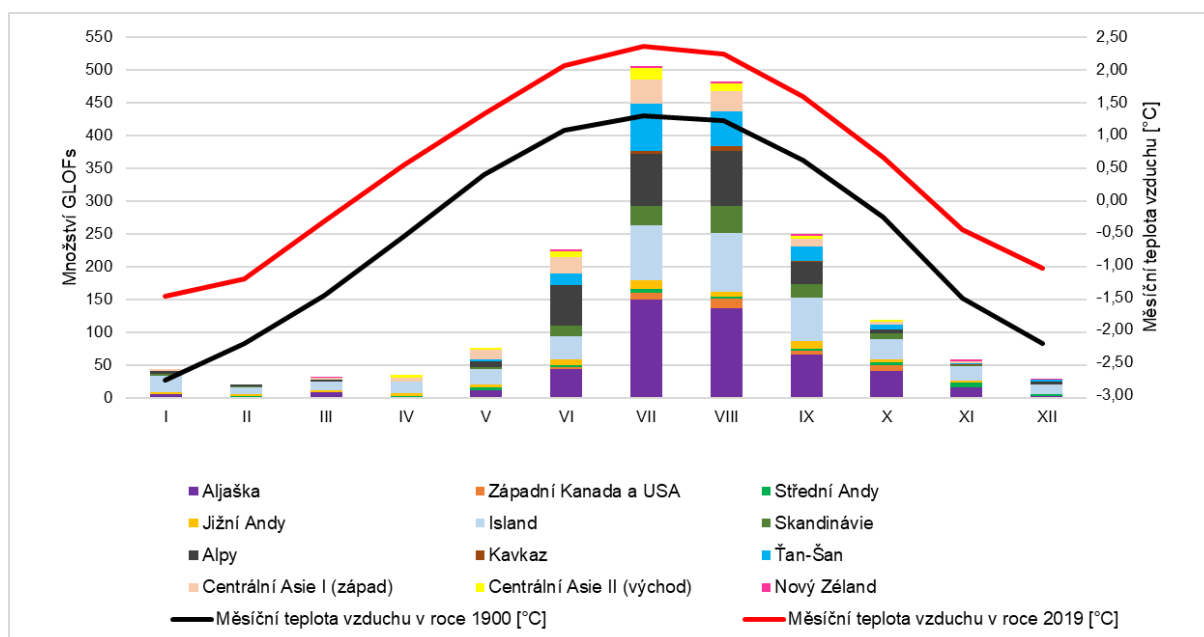
Analyzovaný region	Korelační koeficient teploty vzduchu	Korelační koeficient srážek	Roční rozpětí teploty vzduchu [°C]	Roční amplituda teploty vzduchu [°C]
Aljaška	0,82	0,38	- 2 až +15	17
Západní Kanada a USA	0,77	- 0,50	- 5 až + 15	20
Střední Andy	- 0,32 (- 0,16)	0,34 (0,65)	+ 8 až + 10	2
Jižní Andy	0,88	0,36	- 2 až + 4	6
Island	0,83	- 0,51	- 2 až + 11	13
Skandinávie	0,85	- 0,48	- 6 až + 13	19
Alpy	0,85	0,72	- 7 až + 11	18
Kavkaz	0,63	0,09	- 12 až + 10	22
Řan-Šan	0,75	0,67	- 12 až + 9	21
Centrální Asie I (západ)	0,93	0,77	- 13 až + 11	24
Centrální Asie II (východ)	0,82	0,93	- 2 až + 12	14
Nový Zéland	0,66	0,30	- 1 až + 11	12

## 6.5.2 Četnost zaznamenaných GLOFs v jednotlivých měsících

Výsledky uvedené v Grafu 52 potvrzují závislost výskytu GLOFs na teplotě vzduchu. K nejvíce GLOFs dochází především v teplé polovině roku (období mezi IV. a IX. měsícem), kde se na jejich množství podílí převážně regiony Aljaška, Island, Alpy a Řan-Šan. Naopak nejméně případů se vyskytuje v chladné polovině roku (období mezi X. a III. měsícem), kde má na celkovém množství zaznamenaných GLOFs největší podíl Island. Vysoký podíl je na Islandu podmíněn především vulkanismem, který zde po celý rok podmiňuje vznik ledovcových povodní (Björnsson 1992).

Křivky zobrazující globální teplotu vzduchu v letech 1900 a 2019 ukazují, že se během tohoto časového období zvýšila teplota vzduchu o více než 1 °C. Díky korelaci mezi počtem GLOFs a teplotou je pravděpodobné, že bude neustálým oteplováním (viz Kapitola 6.4) docházet ke stále častějším ledovcovým povodním.

Graf 52: Závislost zaznamenaných GLOFs na teplotě vzduchu v jednotlivých měsících vlastní zpracování (Veh a kol. 2022; NASA 2023)



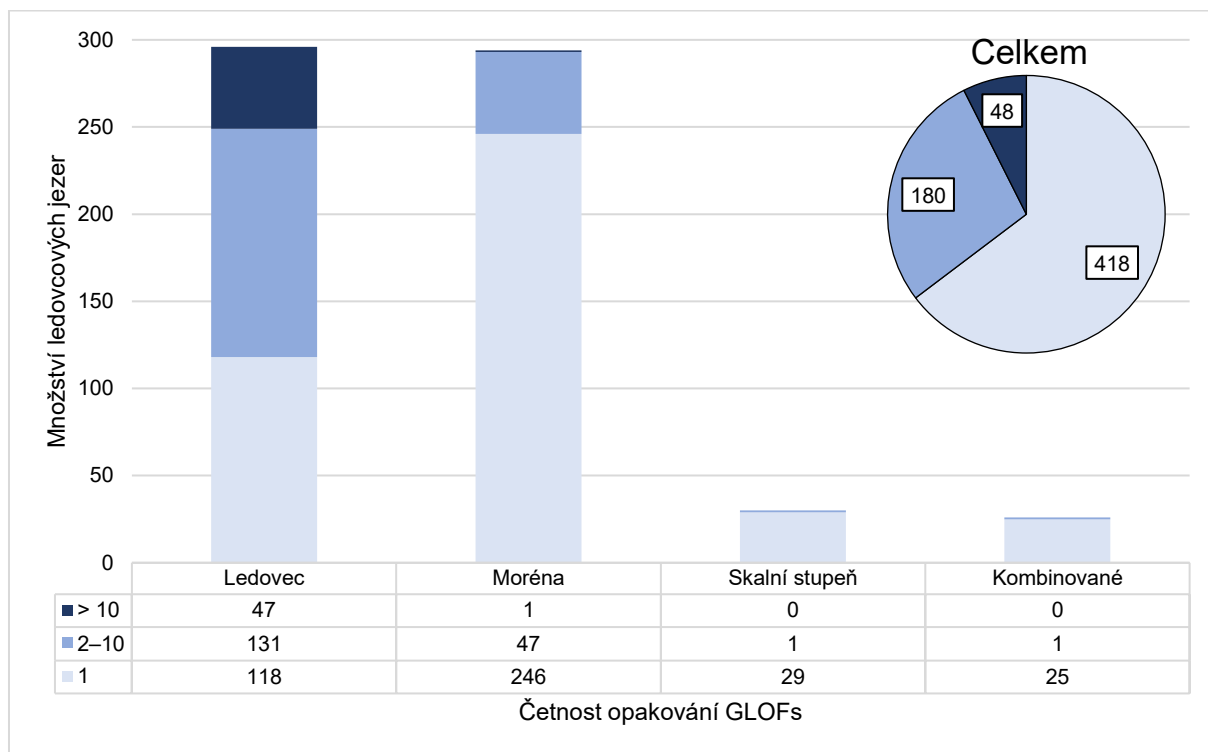
## 6.6 Četnost opakování GLOFs

Podle výsledků dochází ke GLOFs nejčastěji z jezer hrazených morénou či ledovcem (viz Graf 53), u kterých dochází především k protržení hráze (viz Kapitola 6.3). Naopak v mnohem menším množství dochází k selhání hráze, u jezer hrazených skalním stupněm (pouze ve formě přelití) a jezer s kombinovanou hrází (především ve formě přelití).

Zhruba u poloviny zaznamenaných jezer hrazených ledovcem docházelo k opakovanému selhání hráze, které se tak u tohoto typu jezer vyskytuje nejčastěji. U necelých padesáti ledovcem hrazených jezer selhala hráz více než 10krát, přičemž největší množství GLOFs (149) bylo zaznamenáno u jezera Hidden Creek Lake. U ledovcových jezer, které nejsou hrazeny ledovcem, selhala hráz nejčastěji pouze jednou.

Při celkovém zhodnocení dochází u ledovcových jezer nejčastěji k ojedinělému selhání hráze. Zhruba u každého třetího ledovcového jezera dochází k vylití vody vícekrát, z toho převážně u ledovcem hrazených jezer.

Graf 53: Četnost opakování GLOFs ve sledovaných regionech  
vlastní zpracování (Veh a kol. 2022)



## 7 DISKUSE

Bakalářská práce měla za účel analyzovat a porovnat jednotlivé regiony na základě dat dostupných v databázi GLOFs (Veh a kol. 2022). V diskusi je vedena pozornost na faktory zvyšující nepřesnost zpracovaných dat, na přínos samotné databáze a na možnosti vedoucí ke snížení počtu nových ledovcových povodní.

### 7.1 Faktory ovlivňující přesnost analýzy databáze GLOFs.

Pomocí analýzy databáze GLOFs bylo možné popsat chování GLOFs v jednotlivých regionech. Výsledná spolehlivost dat je u každé z analyzovaných oblastí odlišná, jelikož je každá oblast ovlivňována různými faktory zvyšujícími jejich nepřesnost.

Mezi takové faktory lze zařadit nejednotnou klasifikaci parametrů popisujících GLOFs. Například výskyty GLOFs pocházejících z jezer s kombinovaným typem hráze jsou v databázi uvedeny pouze pro Střední Andy. Je ovšem pravděpodobné, že selhání kombinované hráze nastalo i v jiných oblastech, kde mohly být tyto případy klasifikovány jako selhání morénové hráze či selhání skalního stupně.

Přesnost výsledné analýzy je u každé zkoumané oblasti zároveň určována dostupností dat. Četnost dostupnosti historických dat bývá nižší v oblastech, které byly relativně pozdě osídleny. Dostupnost dat je také dána množstvím uskutečněných výzkumů GLOFs, v analyzovaných oblastech. Například vývoj GLOFs v pohoří Alpy lze v databázi sledovat již od 15. století, zatímco v pohoří Ťan-Šan pochází první zmínky o GLOFs až z počátku 20. století. Kvůli nerovnoměrné míře dostupnosti dat nevystihuje analýza databáze GLOFs (Veh a kol. 2022) zcela přesně míru nárůstu, či poklesu GLOFs v jednotlivých oblastech. Náhlý nárůst zaznamenaných případů GLOFs v krátkém časovém období tak mohl v některých oblastech vzniknout například intenzivnějším výzkumem či využíváním přesnějších metod (viz Kapitola 5.3.2.2).

Vliv na přesnost analýzy má také celková četnost zaznamenaných ledovcových povodní, kdy jejich nižší množství snižuje pravděpodobnost spolehlivě charakterizovat jednotlivé oblasti. Například u regionů Kavkaz a Nový Zéland nelze díky malému množství dat zjistit, zda zde dochází k rostoucí, či klesající tendenci výskytu nových GLOFs.

Dalším faktorem ovlivňujícím výslednou spolehlivost dat v různých regionech je využívání odlišných výzkumných metod. Například pouze u některých ledovcových jezer, kde došlo k vylití vody, byl proveden terénní výzkum, kvůli kterému by bylo možné získat více informací o proběhlé události. Nestejný sběr informací o jednotlivých GLOFs se v databázi může projevat chybějícími daty. U některých regionů je tak v databázi dostupná informace o typu ledovcem hrazeného jezera (např. englaciální, supraglaciální) či výjimečně

o případných potenciálních příčinách způsobujících GLOF, zatímco u jiných oblastí tyto informace v databázi chybí.

I při maximálním důrazu na zaznamenávání jednotlivých dat není možné, aby výsledná analýza zcela vystihovala chování GLOFs v jednotlivých oblastech a mezi nimi. Přesnost výsledné analýzy je pod vlivem jak výše zmíněných faktorů, tak mnoho dalších vlivů, působících na regionální či globální úrovni. Mezi takové lze například zařadit různé klimatické jevy a anomálie.

Výsledků, které by přesněji vystihovaly chování GLOFs, by bylo možné pro každou oblast dosáhnout například dlouhodobým sběrem dat, úplností dat popisujících proběhlé události či jednotnou klasifikací parametrů popisujících GLOFs. Zároveň by bylo možné zvýšit přesnost a rozšířit možnosti výsledné analýzy zjišťováním nových parametrů, které nejsou v databázi uvedeny či se v ní téměř nevyskytují. Mezi takové parametry lze zařadit zejména příčiny vzniku GLOFs, jejichž podrobnější výzkum by mohl pomoci lépe pochopit problematiku spojenou s jejich chováním.

Zvýšení přesnosti budoucích analýz by bylo možné dosáhnout také porovnáním parametrů v analyzované databázi s parametry v jiných případných regionálních či globálních databázích zaznamenávajících proběhlá GLOFs. Vzájemným porovnáním parametrů by tak bylo možné vyhledat možné nepřesnosti mezi uvedenými daty a zároveň by bylo možné nalézt nové parametry, které v databázi GLOFs (Veh a kol. 2022) uvedeny nejsou.

Výhodou databáze je možnost dlouhodobého a podrobného zaznamenávání jednotlivých dat popisujících GLOFs. Následné analýzy takové databáze mohou mít přínos zejména pro sledování vývoje GLOFs v jednotlivých oblastech, kde mohou představovat určité riziko.

Nevýhoda samotné analýzy databáze GLOFs spočívá, kromě zmíněných faktorů ovlivňujících její přesnost, také v nemožnosti vzájemně porovnávat absolutní hodnoty z důvodu nestejně velkých zkoumaných regionů. Pro lepší srovnatelnost je nutné mezi zkoumanými oblastmi porovnávat analyzovaná data v relativních hodnotách.

## **7.2 Zavedení možných protipatření**

Výsledky provedené analýzy databáze GLOFs (Veh a kol. 2022) nasvědčují celosvětově rostoucí tendenci nových případů GLOFs (viz Kapitola 6.4). Vzhledem k tomu, že mohou potenciální záplavy ohrozit místní obyvatelstvo a infrastrukturu je nutné provádět náležitá protipatření vedoucí ke snížení výskytu nových ledovcových povodní.

Jako spolehlivé protipatření se jeví zpevňování hrází u potenciálně nebezpečných jezer. Zpevňování hrází je patrné v regionu Západní Kanada a USA, kde došlo v 90. letech k výraznému poklesu v množství ledovcových povodní (viz Kapitola 5.1.2.2). Podobná protipatření by bylo vhodné aplikovat i v jiných oblastech, kde dle provedené analýzy



databáze GLOFs (Veh a kol. 2022) dochází k výraznému nárůstu ledovcových povodní. Jelikož každé potenciální GLOF představuje jinou míru nebezpečí, je zapotřebí možná rizika u každého ledovcového jezera řádně vyhodnotit. Na základě klasifikace nebezpečí jednotlivých jezer by se mělo následně zavedení možných protipatření primárně zaměřit na lokality, kde povodně představují největší riziko.

## 8 ZÁVĚR

Na základě dat dostupných v databázi GLOFs (Veh a kol. 2022) bylo celkem analyzováno 2939 GLOFs, ke kterým nejčastěji došlo až po konci 19. století. Zmíněné ledovcové povodně pocházejí ze 707 ledovcových jezer, která byla na základě jejich lokalizace rozdělena do oblastí Aljaška, Západní Kanada a USA, Střední Andy, Jižní Andy, Island, Skandinávie, Alpy, Kavkaz, Ťan-Šan, Centrální Asie I (západ), Centrální Asie II (východ) a Nový Zéland.

Z analyzovaných výsledků vyplývá, že necelých 25 % GLOFs vzniklo v regionu Aljaška. Na Aljašce má na celkovém množství GLOFs významný podíl ledovcem hrazené jezero Hidden Creek Lake, u kterého bylo zaznamenáno nejvíce opakovaných ledovcových povodní. Více než 90 % GLOFs, pocházejících z ledovcem hrazených jezer, bylo zaznamenáno v oblastech Skandinávie, Island a Aljaška, které se v rámci všech regionů nacházejí nejseverněji. Naopak v oblastech Střední Andy a Centrální Asie II (východ), které se nacházejí nejbližší k rovníku, pochází více než 90 % GLOFs z jezer, které nejsou hrazeny ledovcem. Četnost GLOFs pocházejících z různých typů ledovcových jezer je tak ve zmíněných oblastech nejvíce ovlivňována zonalitou klimatu, zatímco v jiných oblastech mají, kromě zonality klimatu, významný vliv především jiné klimatické faktory, kterými jsou například asijské monzuny či vzdálenost od oceánu.

V analyzovaných oblastech dochází ke GLOFs nejčastěji z ledovcem hrazených jezer. U tohoto typu jezer je navíc GLOF povětšinou způsoben protržením hráze, a to především v důsledku otevření subglaciálního kanálu odvádějícího vodu pod ledovcovou hrází. V menší míře stále dominuje protržení hráze u morénou hrazených jezer, jejichž převažující výskyt je pouze v oblastech poblíž rovníku. Naopak u jezer s kombinovanou hrází, kterých bylo analyzováno nejméně, dochází ke vzniku GLOF převážně v souvislosti s přelitím hráze. K události typu GLOF dochází v malém množství i u jezer nacházejících se za skalním stupněm, u kterých, v případě vzniku ledovcové povodně, dochází k přelití hráze pokaždé.

Ve všech analyzovaných oblastech došlo mezi lety 1900–2019 k oteplení. Kromě nárůstu teploty převažuje ve většině oblastí také neustále rostoucí tendence výskytu nových GLOFs. Výjimkou je pohoří Ťan-Šan a Západní Kanada a USA, kde je klesající tendence pravděpodobně způsobena zpevněním hrází u potenciálně nebezpečných jezer. V průběhu roku je nejvyšší výskyt GLOFs pozorován především v letních měsících. V oblastech s ledovcem hrazenými jezery jsou důvodem především kladné teploty, způsobující tání ledu a sněhu, čímž se mohou ledovcová jezera následně plnit vodou. Naopak v oblastech s převažujícími jezery, která nejsou hrazena ledovcem mají na vznik GLOFs velký vliv srážky. V takových oblastech ke GLOFs v období sucha téměř nedochází. Vliv na výskyt GLOFs mají i jiné faktory než klimatické. Například v oblasti Island podmiňuje celoroční výskyt GLOFs především vulkanismus, způsobující ledovcové povodně zejména typu jökulhlaup. Dalším

faktorem může být zemětřesení, které v roce 1970 vyvolalo ve Středních Andách 5 ledovcových povodní.

U 1/3 analyzovaných ledovcových jezer došlo k ledovcové povodni více než jednou. Nejčastěji k takové události dochází u ledovcem hrazených jezer, díky snadné obnovitelnosti hráze a znovunaplnění jezera vodou. Naopak k velkému množství ojedinělých případů vylití vody dochází převážně u všech typů jezer, které ledovcem hrazeny nejsou.

## 9 ZDROJE

ÁCS, F., TAKÁCS, D., BREUER, H., SKARBIT, N. (2018): Climate and climate change in the Austrian–Swiss region of the European Alps during the twentieth century according to Feddema. *Theoretical and Applied Climatology*, 3–4, 133, 899–910.

AGATOVA, A. R., NEPOP, R. K., CARLING, P. A., BOHORQUEZ, P., KHAZIN, L. B., ZHDANOVA, A. N., MOSKA, P. (2020): Last ice-dammed lake in the Kuray basin, Russian Altai: New results from multidisciplinary research. *Earth-Science Reviews*, February 2019, 205, 103183.

AGETA, Y., HIGUCHI, K. (1984): Estimation of mass balance components of a summer-accumulation type glacier in the Nepal Himalaya. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 3, 66, 249–255.

AGRAWALA, S. (2007): Climate change in the European Alps: adapting winter tourism and natural hazards management. Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD).

AIZEN, V. B. (1994): Features of regime and mass exchange of some glaciers on central Asia periphery. *Bulletin of glacier research*, 12, 9–24.

AIZEN, V. B., AIZEN, E. M., MELACK J. M. (1995): Climate snow cover glaciers and runoff in the Tien Shan central Asia. *Water Resour. Bull.*, 31, 1113–1129.

ALLEN, S. K., LINSBAUER, A., RANDHAWA, S. S., HUGGEL, C., RANA, P., KUMARI, A. (2016): Glacial lake outburst flood risk in Himachal Pradesh, considering current and future threats. *Natural Hazards*, 3, 84, 1741–1763.

ANDERSON, S. P., WALDER, J. S., ANDERSON, R. S., KRAAL, E. R., CUNICO, M., FOUNTAIN, A. G., TRABANT, D. C. (2003): Integrated hydrologic and hydrochemical observations of Hidden Creek Lake jökulhlaups, Kennicott Glacier, Alaska. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, F1, 108, n/a-n/a.

AZAM, M. F., WAGNON, P., BERTHIER, E., VINCENT, C., FUJITA, K., KARGEL, J. S. (2018): Review of the status and mass changes of Himalayan-Karakoram glaciers. *Journal of Glaciology*, 243, 64, 61–74.

BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A., TRAPPMANN, D., MADRIGAL-GONZÁLEZ, J., ECKERT, N., STOFFEL, M. (2018): Climate warming enhances snow avalanche risk in the Western Himalayas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 13, 115, 3410–3415.

BAZAI, N. A., CUI, P., CARLING, P. A., WANG, H., HASSAN, J., LIU, D., ZHANG, G., JIN,

W. (2021): Increasing glacial lake outburst flood hazard in response to surge glaciers in the Karakoram. *Earth-Science Reviews*, August 2020, 212, 103432.

BJÖRNSSON, H. (1988): Hydrology of ice caps in volcanic regions.

BJÖRNSSON, H. (1992): Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation. *Annals of Glaciology*, 16, 95–106.

BJÖRNSSON, H. (2003): Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. *Global and Planetary Change*, 3–4, 35, 255–271.

BLACHUT, S. P., MCCANN, S. B. (1981): The Behavior of a Polar Ice-Dammed Lake, Ellesmere Island, N.W.T., Canada. *Arctic and Alpine Research*, 1, 13, 63–74.

BOGEN, J., XU, M., KENNIE, P. (2015): The impact of pro-glacial lakes on downstream sediment delivery in Norway. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7, 40, 942–952.

BOLCH, T. (2015): Glacier area and mass changes since 1964 in the Ala Archa Valley, Kyrgyz Ala-Too, northern Tien Shan. *Lёд I Sneg*, 01, 129, 28–39.

BOLCH, T., PETERS, J., YEGOROV, A., PRADHAN, B., BUCHROITHNER, M., BLAGOVESHCHENSKY, V. (2011): Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan. *Nat. Hazards*, 59, 1714–1961.

BOOKHAGEN, B., BURBANK, D. W. (2010): Toward a complete Himalayan hydrological budget: Spatiotemporal distribution of snowmelt and rainfall and their impact on river discharge. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, F3, 115.

BOWN, F., RIVERA, A. (2007): Climate changes and recent glacier behaviour in the Chilean Lake District. *Global and Planetary Change*, 1, 59, 79–86.

BREIEN, H., DE BLASIO, F. V., ELVERHØI, A., HØEG, K. (2008): Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway. *Landslides*, 3, 5, 271–280.

CAREY, M. (2005): Living and dying with glaciers: People’s historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global and Planetary Change*, 2-4 SPEC. ISS., 47, 122–134.

CARRIVICK, J. L., RUSHMER, L. (2006): Understanding high-magnitude outburst floods. 2, 22, 60–65.

CARRIVICK, J. L., SUTHERLAND, J. L., HUSS, M., PURDIE, H., STRINGER, C. D., GRIMES, M., JAMES, W. H. M., LORREY, A. M. (2022): Coincident evolution of glaciers and

ice-marginal proglacial lakes across the Southern Alps, New Zealand: Past, present and future. *Global and Planetary Change*, February, 211, 103792.

CARRIVICK, J. L., TWEED, F. S. (2013): Proglacial lakes : character , behaviour and geological importance. *Quaternary Science Reviews*, 78, 34–52.

CHEN, Y., XU, C., CHEN, Y., LI, W., LIU, J. (2010): Response of glacial-lake outburst floods to climate change in the Yarkant River basin on northern slope of Karakoram Mountains, China. *Quaternary International*, 1–2, 226, 75–81.

CHIARLE, M., GEERTSEMA, M., MORTARA, G., CLAGUE, J. J. (2021): Relations between climate change and mass movement: Perspectives from the Canadian Cordillera and the European Alps. *Global and Planetary Change*, 202, 103499.

CHURCH, J., WILSON, stan, WOODWORTH, P., AARUP, T. (2007): Understanding Sea Level Rise and Variability. *EOS Transactions*, 88, 43.

CLAGUE, J. J., EVANS, S. G. (2000): A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia . *Quaternary Science Reviews* A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1763–1783.

CLAGUE, J. J., O'CONNOR, J. E. (2021): Chapter 14 - Glacier-related outburst floods. In: Haeberli, W., Whiteman Risks, and Disasters (Second Edition), C. B. T.-S. and I.-R. H. (eds.): *Hazards and Disasters Series*. Elsevier, 467–499.

CLARKE, G., MATHEWS, W. (2011): Estimates of the magnitude of glacier outburst floods from Lake Donjek, Yukon Territory, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 1452–1463.

CLUFF, L. S. (1971): Peru earthquake of May 31, 1970; engineering geology observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 3, 61, 511–533.

COGLEY, J. G. (2016): Glacier shrinkage across high mountain Asia. *Annals of Glaciology*, 71, 57, 41–49.

DAVILA, L., LOARTE, E. (2018): *Las Cordilleras Glaciares del Perú*: INAIGEM, Huaraz.

DELINÉ, P., GRUBER, S., DELALOYE, R., FISCHER, L., GEERTSEMA, M., GIARDINO, M., HASLER, A., KIRKBRIDE, M., KRAUTBLATTER, M., MAGNIN, F. (2015): Ice loss and slope stability in high-mountain regions. In: *Snow and ice-related hazards, risks, and disasters*. Elsevier, 521–561.

DRAEBING, D., KRAUTBLATTER, M. (2019): The efficacy of frost weathering processes in alpine rockwalls. *Geophysical Research Letters*, 12, 46, 6516–6524.

- DRIEDGER, C. L., FOUNTAIN, A. G. (1989): Glacier Outburst Floods at Mount Rainier, Washington State, U.S.A. *Annals of Glaciology*, 13, 51–55.
- DUBEY, S., GOYAL, M. K. (2020): Glacial Lake Outburst Flood Hazard, Downstream Impact, and Risk Over the Indian Himalayas. *Water Resources Research*, 4, 56, e2019WR026533.
- DUSSAILLANT, A., BENITO, G., BUYTAERT, W., CARLING, P., MEIER, C., ESPINOZA, F. (2010): Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: an increasing hazard? *Natural Hazards*, 2, 54, 469–481.
- DUSSAILLANT, I., BERTHIER, E., BRUN, F., MASIOKAS, M., HUGONNET, R., FAVIER, V., RABATEL, A., PITTE, P., RUIZ, L. (2019): Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 10, 12, 802–808.
- EMMER, A. (2017): Glacier retreat and glacial lake outburst floods (GLOFs). In: *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*.
- EMMER, A. (2018): GLOFs in the WOS: Bibliometrics, geographies and global trends of research on glacial lake outburst floods (Web of Science, 1979-2016). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 18, 813–827.
- EMMER, A., COCHACHIN, A. (2013): The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the cordillera blanca, North American Cordillera, and Himalayas. *Acta Universitatis Carolinae, Geographica*, 2, 48, 5–15.
- EMMER, A., KLIMEŠ, J., MERGILI, M., VILÍMEK, V., COCHACHIN, A. (2016): 882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. *CATENA*, 147, 269–279.
- EMMER, A., MERKL, S., MERGILI, M. (2015): Spatiotemporal patterns of high-mountain lakes and related hazards in western Austria. *Geomorphology*, 246, 602–616.
- EMMER, A., VILÍMEK, V. (2013): Review article: lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: an example from the Cordillera Blanca (Peru). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1551–1565.
- EMMER, A., VILÍMEK, V., KLIMEŠ, J., COCHACHIN, A. (2014): Glacier Retreat, Lakes Development and Associated Natural Hazards in Cordillera Blanca, Peru BT - Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change. In: Shan, W., Guo, Y., Wang, F., Marui, H., Strom, A. (eds.). Springer International Publishing, Cham, 231–252.
- EPI (2015): Average Global Temperature by Decade, 1880-2014 (Celsius), [https://www.earth-policy.org/data\\_center/C23](https://www.earth-policy.org/data_center/C23) (20. 4. 2022).

- FALÁTKOVÁ, K. (2014): Glaciální jezera v Kyrgyzstánu ohrožená průvalem (případová studie: ledovcový komplex Adygine). Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Praha (5. 2. 2023).
- FREI, C., CHRISTENSEN, J. H., DÉQUÉ, M., JACOB, D., JONES, R. G., VIDALE, P. L. (2003): Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, D3, 108.
- FUJITA, K., SUZUKI, R., NUIMURA, T., SAKAI, A. (2008): Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya. *Journal of Glaciology*, 185, 54, 220–228.
- FURIAN, W., LOIBL, D., SCHNEIDER, C. (2021): Future glacial lakes in High Mountain Asia: An inventory and assessment of hazard potential from surrounding slopes. *Journal of Glaciology*, 264, 67, 653–670.
- GIESE, E., MOSSIG, I., RYBSKI, D., BUNDE, A. (2007): Long-term analysis of air temperature trends in central Asia (Analyse langjähriger Zeitreihen der Lufttemperatur in Zentralasien). *Erdkunde*, 186–202.
- GOOGLE (2022): Google Earth, <https://earth.google.com/web/> (14. 4. 2022).
- HACK, H. R. G. K. (2020): Weathering, Erosion, and Susceptibility to Weathering BT - Soft Rock Mechanics and Engineering. In: Kanji, M., He, M., Ribeiro e Sousa, L. (eds.). Springer International Publishing, Cham, 291–333.
- HAEBERLI, W., SCHAUB, Y., HUGGEL, C. (2017): Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293, 405–417.
- HARRISON, S., KARGEL, J. S., HUGGEL, C., REYNOLDS, J., SHUGAR, D. H., BETTS, R. A., EMMER, A., GLASSER, N., HARITASHYA, U. K., KLIMEŠ, J., REINHARDT, L., SCHAUB, Y., WILTSHIRE, A., REGMI, D., VILÍMEK, V. (2018): Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, 4, 12, 1195–1209.
- HARRISON, S., WINCHESTER, V. (2000): Nineteenth- and Twentieth-Century Glacier Fluctuations and Climatic Implications in the Arco and Colonia Valleys, Hielo Patagónico Norte, Chile. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 1, 32, 55–63.
- HEWITT, K. (2005): The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the 'elevation effect,'Karakoram Himalaya. *Mountain Research and Development*, 4, 25, 332–340.



HEWITT, K. (2009): The Karakoram Anomaly? Glacier Expansion and the 'Elevation Effect,' Karakoram Himalaya. *Mountain Research and Development*, 25, 332–340.

HURRELL, J. W. (1995): Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 5224, 269, 676–679.

JACQUET, J., MCCOY, S. W., MCGRATH, D., NIMICK, D. A., FAHEY, M., O'KUNGHINGTONS, J., FRIESEN, B. A., LEIDICH, J. (2017): Hydrologic and geomorphic changes resulting from episodic glacial lake outburst floods: Rio Colonia, Patagonia, Chile. *Geophysical Research Letters*, 2, 44, 854–864.

JAIN, S. K., LOHANI, A. K., SINGH, R. D., CHAUDHARY, A., THAKURAL, L. N. (2012): Glacial lakes and glacial lake outburst flood in a Himalayan basin using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, 3, 62, 887–899.

JAKOB, L., GOURMELEN, N., EWART, M., PLUMMER, S. (2021): Spatially and temporally resolved ice loss in High Mountain Asia and the Gulf of Alaska observed by CryoSat-2 swath altimetry between 2010 and 2019. *The Cryosphere*, 4, 15, 1845–1862.

JANSKÝ, B., ENGEL, Z., ŠOBR, M., BENEŠ, V., ŠPAČEK, K., YEROKHIN, S. (2009): The evolution of Petrov lake and moraine dam rupture risk (Tien-Shan, Kyrgyzstan). *Natural Hazards*, 1, 50, 83–96.

JANSKÝ, B., ŠOBR, M., ENGEL, Z. (2010): Outburst flood hazard: Case studies from the Tien-Shan Mountains, Kyrgyzstan. *Limnologica*, 4, 40, 358–364.

JOHNSTON, D. M., HOUGHTON, B. F., NEALL, V. E., RONAN, K. R., PATON, D. (2000): Impacts of the 1945 and 1995–1996 Ruapehu eruptions, New Zealand: An example of increasing societal vulnerability. *GSA Bulletin*, 5, 112, 720–726.

JUŘICOVÁ, A., FRATIANNI, S. (2018): Climate change and its relation to the fluctuation in glacier mass balance in the Cordillera Blanca, Peru: A review. *AUC GEOGRAPHICA*, 53, 106–118.

KAPNICK, S. B., DELWORTH, T. L., ASHFAQ, M., MALYSHEV, S., MILLY, P. C. D. (2014): Snowfall less sensitive to warming in Karakoram than in Himalayas due to a unique seasonal cycle. *Nature Geoscience*, 11, 7, 834–840.

KHANAL, N. R., MOOL, P. K., SHRESTHA, A. B., RASUL, G., GHIMIRE, P. K., SHRESTHA, R. B., JOSHI, S. P. (2015): A comprehensive approach and methods for glacial lake outburst flood risk assessment, with examples from Nepal and the transboundary area. *International Journal of Water Resources Development*, 2, 31, 219–237.

- KONRAD, S. K., HUMPHREY, N. F., STEIG, E. J., CLARK, D. H., POTTER JR, N., PFEFFER, W. T. (1999): Rock glacier dynamics and paleoclimatic implications. *Geology*, 12, 27, 1131–1134.
- LAU, K.-M., LI, M.-T. (1984): The Monsoon of East Asia and its Global Associations—A Survey. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2, 65, 114–125.
- LIU, J. J., TANG, C., CHENG, Z. L. (2013): The two main mechanisms of Glacier Lake Outburst Flood in Tibet, China. *Journal of Mountain Science*, 2, 10, 239–248.
- LLIBOUTRY, L., ARNAO, B. M., SCHNEIDER, B. (1977): Glaciological Problems Set by the Control of Dangerous Lakes in Cordillera Blanca, Peru. III. Study of Moraines and Mass Balances at Safuna. *Journal of Glaciology*, 79, 18, 275–290.
- LUTZ, A. F., IMMERZEEL, W. W., SHRESTHA, A. B., BIERKENS, M. F. P. (2014): Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nature Climate Change*, 7, 4, 587–592.
- MA, J., SONG, C., WANG, Y. (2021): Spatially and Temporally Resolved Monitoring of Glacial Lake Changes in Alps During the Recent Two Decades. *Frontiers in Earth Science*, 9, 723386.
- MARK, B., SELTZER, G. (2005): Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): Spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24, 2265–2280.
- MASIOKAS, M. H., RIVERA, A., ESPIZUA, L. E., VILLALBA, R., DELGADO, S., ARAVENA, J. C. (2009): Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 3, 281, 242–268.
- MAURER, J. M., SCHAEFER, J. M., RUPPER, S., CORLEY, A. (2019): Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years. *Science Advances*, 6, 5.
- METEOBLUE (2023): Podnebí (modelované), [https://www.meteoblue.com/cs/počasí/historyclimate/climatemodelled/rocky-mountains\\_kanada\\_6126752?fbclid=IwAR2\\_ZPqkGwZZmex4cd8SEY6oY1GdcZirZiy-rmE\\_RNgcEMrXRj7W2FBR\\_9w](https://www.meteoblue.com/cs/počasí/historyclimate/climatemodelled/rocky-mountains_kanada_6126752?fbclid=IwAR2_ZPqkGwZZmex4cd8SEY6oY1GdcZirZiy-rmE_RNgcEMrXRj7W2FBR_9w) (5. 4. 2023).
- METEOROLOGIA EN RED (2023): Factores del clima, <https://www.meteorologiaenred.com/cs/klimatické-factory.html> (6. 1. 2023).
- MINORA, U., BOCCHIOLA, D., D'AGATA, C., MARAGNO, D., MAYER, C., LAMBRECHT, A., MOSCONI, B., VUILLERMOZ, E., SENESE, A., COMPOSTELLA, C., SMIRAGLIA, C.,

DIOLAIUTI, G. (2013): 2001–2010 glacier changes in the Central Karakoram National Park: a contribution to evaluate the magnitude and rate of the “Karakoram anomaly.” *The Cryosphere Discussions*, 7, 7538.

MIR, R. A., JAIN, S. K., LOHANI, A. K., SARAF, A. K. (2018): Glacier recession and glacial lake outburst flood studies in Zaskar basin, western Himalaya. *Journal of Hydrology*, 564, 376–396.

NASA (2019): GISS Surface Temperature Analysis (v4): Station Data, [https://data.giss.nasa.gov/gistemp/station\\_data\\_v4\\_globe/](https://data.giss.nasa.gov/gistemp/station_data_v4_globe/) (8. 4. 2022).

NASA (2023): GISS Surface Temperature Analysis (v4): Analysis Graphs and Plots, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/> (2. 3. 2023).

NEMA, P., NEMA, S., ROYA, P. (2012): An overview of global climate changing in current scenario and mitigation action. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 16, 2329–2336.

NIE, Y., SHENG, Y., LIU, Q., LIU, L., LIU, S., ZHANG, Y., SONG, C. (2017): A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015. *Remote Sensing of Environment*, 189, 1–13.

NOAA (2023): Climate at a Glance: Global Time Series, <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/land/12/3/1850-2023> (18. 2. 2023).

O’CONNOR, J., COSTA, J. (2004): *The World’s Largest Floods, Past and Present: Their Causes and Magnitudes*. US Geological Survey Circular, 1254.

O’CONNOR, J. E., COSTA, J. E. (1993): Geologic and hydrologic hazards in glacierized basins in North America resulting from 19th and 20th century global warming. *Natural Hazards*, 2, 8, 121–140.

OIEN, R. P., SPAGNOLO, M., REA, B. R., BARR, I. D., BINGHAM, R. G. (2020): Climatic controls on the equilibrium-line altitudes of Scandinavian cirque glaciers. *Geomorphology*, 352, 106986.

PALAZZI, E., VON HARDENBERG, J., TERZAGO, S., PROVENZALE, A. (2015): Precipitation in the Karakoram-Himalaya: a CMIP5 view. *Climate Dynamics*, 1, 45, 21–45.

PASSMORE, D. G., HARRISON, S., WINCHESTER, V., RAE, A., SEVERSKIY, I., PIMANKINA, N. V (2008): Late Holocene debris flows and valley floor development in the northern Zailiiskiy Alatau, Tien Shan mountains, Kazakhstan. *Arctic, Antarctic, and Alpine*

Research, 3, 40, 548–560.

PAUL, F., KÄÄB, A., HAEBERLI, W. (2007): Recent glacier changes in the Alps observed by satellite: Consequences for future monitoring strategies. *Global and Planetary Change*, 1–2, 56, 111–122.

PAUL, F., RASTNER, P., AZZONI, R. S., DIOLAIUTI, G., FUGAZZA, D., LE BRIS, R., NEMEC, J., RABATEL, A., RAMUSOVIC, M., SCHWAIZER, G. (2020): Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2. *Earth System Science Data*, 3, 12, 1805–1821.

PORTER, S. C. (2007): GLACIATIONS | Neoglaciation in the American Cordilleras. In: *Encyclopedia of Quaternary Science*. 1133–1142.

PRATT, C., MACCIOTTA, R., HENDRY, M. (2019): Quantitative relationship between weather seasonality and rock fall occurrences north of Hope, BC, Canada. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 5, 78, 3239–3251.

RASMUSSEN, L. A., CONWAY, H., RAYMOND, C. F. (2007): Influence of upper air conditions on the Patagonia icefields. *Global and Planetary Change*, 1, 59, 203–216.

RAY, R. L., JACOBS, J. M. (2007): Relationships among remotely sensed soil moisture, precipitation and landslide events. *Natural Hazards*, 2, 43, 211–222.

RICHARDSON, S. D., REYNOLDS, J. M. (2000): An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65–66, 31–47.

RICK, B., MCGRATH, D., ARMSTRONG, W., MCCOY, S. W. (2022): Dam type and lake location characterize ice-marginal lake area change in Alaska and NW Canada between 1984 and 2019. *Cryosphere*, 1, 16, 297–314.

RIGNOT, E., RIVERA, A., CASASSA, G. (2003): Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Sea Level Rise. *Science*, 5644, 302, 434–437.

RIVERA, A., ACUÑA, C., CASASSA, G., BOWN, F. (2002): Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Annals of Glaciology*, 34, 367–372.

RUSSELL, A. J. (2007): Controls on the sedimentology of an ice-contact jökulhlaup-dominated delta, Kangerlussuaq, west Greenland. *Sedimentary Geology*, 1, 193, 131–148.

SÆMUNDSSON, Þ., BEN-YEHOSHUA, D., SMAIL, N., HJARTARDÓTTIR, Á. R., WELLS, G., BELART, J. M. C., TOSCHKA, S. (2023): The 1967 Steinsholtsjökull rockslide and GLOF event in light of climate change in Iceland. *Copernicus Meetings*.

- SATTAR, A., GOSWAMI, A., KULKARNI, A. V., EMMER, A., HARITASHYA, U. K., ALLEN, S., FREY, H., HUGGEL, C. (2021): Future Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) hazard of the South Lhonak Lake, Sikkim Himalaya. *Geomorphology*, 388, 107783.
- SCHERLER, D., BOOKHAGEN, B., STRECKER, M. R. (2011): Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. *Nature Geoscience*, 3, 4, 156–159.
- SCHNEIDER, C., GIES, D. (2004): Effects of El Niño-southern oscillation on southernmost South America precipitation at 53°S revealed from NCEP-NCAR reanalyses and weather station data. *International Journal of Climatology*, 24, 1057–1076.
- SCHWANGHART, W., WORN, R., HUGGEL, C., STOFFEL, M., KORUP, O. (2016): Uncertainty in the Himalayan energy–water nexus: estimating regional exposure to glacial lake outburst floods. *Environmental Research Letters*, 7, 11, 74005.
- SEARLE, M. P. (1991): *Geology and tectonics of the Karakoram Mountains*. Wiley New York.
- SHEN, Y., WANG, G., DING, Y. (2009): Changes in Merzbacher Lake of Inylchek glacier and glacial flash floods in Aksu River Basin Tianshan during the period of 1903–2009. *J. Glaciol.*, 31, 993–1002.
- SHRESTHA, A. B., WAKE, C. P., MAYEWSKI, P. A., DIBB, J. E. (1999): Maximum temperature trends in the Himalaya and its vicinity: an analysis based on temperature records from Nepal for the period 1971–94. *Journal of climate*, 9, 12, 2775–2786.
- SHUGAR, D. H., BURR, A., HARITASHYA, U. K., KARGEL, J. S., WATSON, C. S., KENNEDY, M. C., BEVINGTON, A. R., BETTS, R. A., HARRISON, S., STRATTMAN, K. (2020): Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*, 10, 10, 939–945.
- SINGH, V. P., SINGH, P., HARITASHYA, U. K. (2011): *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Springer Science & Business Media, 2011.
- SORG, A., BOLCH, T., STOFFEL, M., SOLOMINA, O., BENISTON, M. (2012): Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (central Asia). *Nature Clim. Change*, 2, 725–731.
- STOKES, C. R., POPOVNIN, V., ALEJNIKOV, A., GURNEY, S. D., SHAHGEDANOVA, M. (2007): Recent glacier retreat in the Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-/proglacial lake development. *Annals of Glaciology*, 46, 195–203.

- TASHILOVA, A. A., ASHABOKOV, B. A., KESHEVA, L. A., TEUNOVA, N. V (2019): Analysis of climate change in the caucasus region: end of the 20th–beginning of the 21st century. *Climate*, 1, 7, 11.
- THORARINSSON, S. (1974): *Vötnin strid. Saga Skeidarárhlaupa og Grimsvatnagosa* (The swift flowing rivers. The history of Grimsvötn jökulhlaups and eruptions) Menningarsjóður, Reykjavík.
- VEH, G., KORUP, O., ROESSNER, S., WALZ, A. (2018): Detecting Himalayan glacial lake outburst floods from Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 207, 84–97.
- VEH, G., KORUP, O., VON SPECHT, S., ROESSNER, S., WALZ, A. (2019): Unchanged frequency of moraine-dammed glacial lake outburst floods in the Himalaya. *Nature Climate Change*, 5, 9, 379–383.
- VEH, G., KORUP, O., WALZ, A. (2020): Hazard from Himalayan glacier lake outburst floods. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2, 117, 907–912.
- VEH, G., LÜTZOW, N., KHARLAMOVA, V., PETRAKOV, D., HUGONNET, R., KORUP, O. (2022): Glacier Lake Outburst Flood Database V2.0, <http://glofs.geoecology.uni-potsdam.de/> (10. 4. 2022).
- VIANI, C., CHIARLE, M., PARANUNZIO, R., MERLONE, A., MUSACCHIO, C., COPPA, G., NIGRELLI, G. (2020): An integrated approach to investigate climate-driven rockfall occurrence in high alpine slopes: the Bessanese glacial basin, Western Italian Alps. *Journal of Mountain Science*, 11, 17, 2591–2610.
- VIANI, C., GIARDINO, M., HUGGEL, Ch., PEROTTI, L., MORTARA, G. (2016): An overview of glacier lakes in the Western Italian Alps from 1927 to 2014 based on multiple data sources (historical maps, orthophotos and reports of the glaciological surveys). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 2, 39, 203–214.
- VILCA, O., MERGILI, M., EMMER, A., FREY, H., HUGGEL, C. (2021): The 2020 glacial lake outburst flood process chain at Lake Salkantaycocha ( Cordillera Vilcabamba , Peru ). April, 2211–2223.
- VILÍMEK, V., EMMER, A., HUGGEL, C., SCHAUB, Y., WÜRMLI, S. (2014a): Database of glacial lake outburst floods (GLOFs)-IPL project No. 179. *Landslides*, 1, 11, 161–165.
- VILÍMEK, V., KLIMEŠ, J., EMMER, A., NOVOTNÝ, J. (2014b): Natural Hazards in the Cordillera Blanca of Peru During the Time of Global Climate Change BT - *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. In: Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y. (eds.). Springer International Publishing, Cham, 261–266.

- VUICHARD, D., ZIMMERMANN, M. (1987): The 1985 Catastrophic Drainage of a Moraine-Dammed Lake , Khumbu Himal , Nepal : Cause and Consequences Author ( s ): Daniel Vuichard and Markus Zimmermann Published by : International Mountain Society Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/3673305> REFE. Mountain Research and Development, 2, 7, 91–110.
- WANG, X., DING, Y., LIU, S., JIANG, L., WU, K., JIANG, Z., GUO, W. (2013): Changes of glacial lakes and implications in Tian Shan, central Asia, based on remote sensing data from 1990 to 2010. Environmental Research Letters, 4, 8, 44052.
- WANNER, H., RICKLI, R., SALVISBERG, E., SCHMUTZ, C., SCHÜEPP, M. (1997): Global climate change and variability and its influence on alpine climate—concepts and observations. Theoretical and Applied Climatology, 58, 221–243.
- WHALLEY, W. B. (1971): Observations of the Drainage of an Ice-Dammed Lake — Strupvatnet, Troms, Norway. Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography, 3–4, 25, 165–174.
- WILLIAMS, R. S., FERRIGNO, J. G. (1993): Satellite image atlas of glaciers of the world. US Government Printing Office.
- WILSON, R., GLASSER, N. F., REYNOLDS, J. M., HARRISON, S., ANACONA, P. I., SCHAEFER, M., SHANNON, S. (2018): Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. Global and Planetary Change, 162, 275–291.
- WILTSHIRE, A. J. (2014): Climate change implications for the glaciers of the Hindu Kush, Karakoram and Himalayan region. The Cryosphere, 3, 8, 941–958.
- WORNI, R., STOFFEL, M., HUGGEL, C., VOLZ, C., CASTELLER, A., LUCKMAN, B. (2012): Analysis and dynamic modeling of a moraine failure and glacier lake outburst flood at Ventisquero Negro, Patagonian Andes (Argentina). Journal of Hydrology, 444–445, 134–145.
- XIN-, W., LIU, S., GUO, W., XU, J. (2008): Assessment and simulation of glacier lake outburst floods for longbasaba and Pida lakes, China. Mountain Research and Development, 3–4, 28, 310–317.
- XU, M., BOGEN, J., WANG, Z., BØNSNES, T. E., GYTRI, S. (2015): Pro-glacial lake sedimentation from jökulhlaups (GLOF), Blåmannsisen, northern Norway. Earth Surface Processes and Landforms, 5, 40, 654–665.
- YAO, X., LIU, S., HAN, L., SUN, M., ZHAO, L. (2018): Definition and classification system of glacial lake for inventory and hazards study. Journal of Geographical Sciences, 2, 28, 193–205.

YEGOROV, A. (2007): Analyse und Bewertung von Naturgefahren als Grundlage für ein nachhaltiges Naturgefahrenmanagement in Gebirgssystemen SO-Kasachstans am Beispiel des Ile-Alatau. Imu.

ZAFAR, M. U., AHMED, M., RAO, M. P., BUCKLEY, B. M., KHAN, N., WAHAB, M., PALMER, J. (2016): Karakorum temperature out of phase with hemispheric trends for the past five centuries. *Climate Dynamics*, 5, 46, 1943–1952.

ZAGINAEV, V., BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A., EROKHIN, S., MATOV, E., PETRAKOV, D., STOFFEL, M. (2016): Reconstruction of glacial lake outburst floods in northern Tien Shan: Implications for hazard assessment. *Geomorphology*, 269, 75–84.

ZAGINAEV, V., PETRAKOV, D., EROKHIN, S., MELESHKO, A., STOFFEL, M., BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A. (2019): Geomorphic control on regional glacier lake outburst flood and debris flow activity over northern Tien Shan. *Global and planetary change*, 176, 50–59.

ZEMP, M., HUSS, M., THIBERT, E., ECKERT, N., MCNABB, R., HUBER, J., BARANDUN, M., MACHGUTH, H., NUSSBAUMER, S. U., GÄRTNER-ROER, I., THOMSON, L., PAUL, F., MAUSSION, F., KUTUZOV, S., COGLEY, J. G. (2019): Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 7752, 568, 382–386.

ZHANG, G., YAO, T., XIE, H., WANG, W., YANG, W. (2015): An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. *Global and Planetary Change*, 131, 148–157.

ZOBACK, M. D., GROLLIMUND, B. (2001): Impact of deglaciation on present-day intraplate seismicity in eastern North America and western Europe. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 1, 333, 23–33.