

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Fyzická geografie a geoekologie



Bc. Adam Emmer

**POTENCIÁLNÍ NEBEZPEČNOST VYBRANÝCH MORÉNAMI
HRAZENÝCH JEZER V POHOŘÍ CORDILLERA BLANCA, PERU**

**POTENTIAL HAZARDOUSNESS OF SELECTED MORaine-
DAMMED LAKES IN THE CORDILLERA BLANCA, PERU**

Diplomová práce

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

Praha, 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou 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, 20. dubna 2013

Podpis:

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu práce a školiteli Doc. RNDr. Vítu Vilímkovi, CSc. za cenné rady, náměty, připomínky a materiály, které mi poskytl při vypracovávání této práce.

ZADÁNÍ PRÁCE

Název práce:

Potenciální nebezpečnost vybraných morénami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca, Peru

Cíle práce:

- 1) Zhodnocení potenciální nebezpečnosti vybraných morénami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca (stanovení možnosti náhlého uvolnění vody akumulované v těchto jezerech)
- 2) Analýza vhodnosti současných metodických přístupů k hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer pro jezera v pohoří Cordillera Blanca

Metody:

rešerše literatury; aplikace rozličných metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer; analýza snímků DPZ; terénní průzkum

Zájmové území:

pohoří Cordillera Blanca, Peru

Datové zdroje:

- 1) odborná literatura (vědecké články, monografie a výzkumné zprávy)
- 2) data DPZ (letecké a družicové snímky)
- 3) data získaná při terénním průzkumu

Datum zadání: 1. února 2012

Jméno studenta: Bc. Adam Emmer

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: Doc. RNDr. Vít Vilímek, Csc.

Podpis vedoucího práce:

Potenciální nebezpečnost vybraných morénami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca, Peru

ABSTRAKT:

Práce je členěna do dvou částí. První část má rešeršní charakter a shrnuje celkem jedenáct metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer (z toho osm metod charakterizovatelných jako kvalitativní a tři jako kvantitativní). Druhá část práce má dva hlavní cíle: 1) Zhodnocení potenciální nebezpečnosti sedmi vybraných morénami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca, a 2) Analýzu vhodnosti současných metod pro morénami hrazená jezera v tomto pohoří. Nezbytná vstupní data pro zhodnocení potenciální nebezpečnosti sedmi studovaných jezer byla získána analýzou snímků DPZ, z výzkumných zpráv institutu INRENA/ANA (Huaráz) a při terénním průzkumu realizovaném v roce 2012. Bylo použito celkem deset metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer. Výsledky hodnocení napříč různými metodami jsou v poměrné shodě. Jako jezero s nejvyšší potenciální nebezpečností bylo v největším počtu metod vyhodnoceno jezero Arhueycocha, následované jezerem Palcacocha. Naopak jezerem s nejnižší potenciální nebezpečností je jezero Rajucolta. Na základě předchozí analýzy povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca bylo stanoveno pět skupin charakteristik odrážejících regionální specifika těchto událostí ve studované oblasti. Jedná se o: A) Možnost dynamického svahového pohybu do jezera; B) Možnost povodňové vlny z jezera situovaného výše proti proudu; C) Možnost protržení hráze v případě silného zemětřesení; D) Rozlišení mezi přírodní hrází a stavebně upravenou hrází; a E) Převýšení hráze (poměr převýšení hráze). Na základě (ne)zohlednění těchto pěti skupin charakteristik bylo zjištěno, že v současných metodách hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer jsou zohledněny vždy nejvýše tři tyto skupiny charakteristik. Všechny metod určitým způsobem zohledňují bod A) a většina E), pouze málokterá metoda však zohledňuje body B), C) a D). Rovněž byla vytvořena nová kvalitativní metoda, která je detailnější než všechny shrnuté metody, a která zohledňuje všechny skupiny regionálně specifických charakteristik vyjma možnosti protržení morénové hráze v případě silného zemětřesení.

Klíčová slova: přírodní ohrožení; morénami hrazená jezera; potenciální nebezpečnost; Cordillera Blanca

Potential hazardousness of selected moraine-dammed lakes in the Cordillera Blanca, Peru

ABSTRACT:

This work is divided into the two parts. First part reviews contemporary methods of assessment of potential hazardousness for moraine-dammed lakes (eight qualitative methods and three quantitative methods). Second part has two main aims: 1) Assessment of potential hazardousness of seven selected moraine-dammed lakes in the Cordillera Blanca, and 2) Analysis of suitability of these methods for use in this region. Required input data for potential hazardousness assessment were gained from analysis of remotely sensed photographs, research papers of INRENA/ANA institute (Huaráz), and from fieldwork realized in 2012. Ten methods of potential hazardousness assessment were applied on seven studied moraine-dammed lakes. There are no significant differences in results obtained in each method. These results showed, that potentially most hazardous lake is that of Arhueycocha, followed by Palcacocha. On the other hand potentially less hazardous lake is that of Rajucolta. Based on analysis of regional specific of causes and mechanisms of glacial lake outburst floods from moraine-dammed lakes in Cordillera Blanca, five groups of characteristics which reflect these regional specifics were merged: A) possibility of dynamic slope movement into the lake; B) possibility of flood wave from a lake situated upstream; C) possibility of dam rupture in case of a large earthquake; D) distinction between natural dam and those with remedial work; and E) the dam freeboard (or ratio of dam freeboard). It is shown that none of the summarised methods uses all these groups of characteristics with, at most, three of the five considered by the summarised methods. All methods account points (A) and most of them (E), but low number of methods account B), C) and D). New qualitative method was also created. This method is more detailed than summarised methods and takes into consideration all groups of regional specifics with exception of possibility of dam rupture in case of a large earthquake.

Keywords: natural hazards; moraine-dammed lakes; potential hazardousness; Cordillera Blanca

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
1 ÚVOD	12
1.1 Cíle a struktura práce	14
2 METODOLOGIE PRÁCE A ZDROJE DAT	16
2.1 Metodologie práce	16
2.1.1 Použití kvalitativních metod	18
2.1.2 Použití kvantitativních metod	19
2.1.3 Zohlednění regionálních specifíků pohoří Cordillera Blanca	19
2.1.4 Tvorba nové kvalitativní metody	19
2.2 Zdroje dat	20
3 METODY HODNOCENÍ POTENCIÁLNÍ NEBEZPEČNOSTI MORÉNYMI HRAZENÝCH JEZER	22
3.1 Kvalitativní metody	24
3.2 Kvantitativní metody	27
3.3 Nová kvalitativní metoda	32
4 CORDILLERA BLANCA	33
4.1 Historie výzkumu jezer v pohoří Cordillera Blanca	35
4.2 Regionální specifika jezer v pohoří Cordillera Blanca	36
4.3 Charakteristika zájmových jezer	39
4.3.1 Jezero Palcacocha	41
4.3.2 Jezero Arhueycocha	43
4.3.3 Jezero Llaca	43

<i>Adam Emmer: Potenciální nebezpečnost vybraných morényami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca, Peru.</i>	8
4.3.4 Jezero Jancarurish	46
4.3.5 Jezero Quitacocha	48
4.3.6 Jezero Tararhua	48
4.3.7 Jezero Rajucolta	51
5 VÝSLEDKY	53
5.1 Vhodnost metod pro jezera v pohoří Cordillera Blanca	53
5.2 Výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer	55
5.2.1 Výsledky hodnocení kvalitativními metodami	55
5.2.2 Výsledky hodnocení kvantitativními metodami	60
5.2.3 Syntéza výsledků	61
5.2.4 Výsledky hodnocení novou kvalitativní metodou	63
6 DISKUSE	65
6.1 Problematika hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer	65
6.2 Metody hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer	68
6.3 Vhodnost metod pro jezera v pohoří Cordillera Blanca	70
6.4 Výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer	70
7 ZÁVĚRY	71
LITERATURA	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Obecné idealizované schema procesu managementu rizika vázaného na morénami hrazená jezera	13
Obr. 2: Geomorfologické důkazy předchozích zalednění v pohoří Cordillera Blanca	34
Obr. 3: Stavebně upravená hráz jezera Llaca (viz 4.3.3); převýšení hráze je 12 m	37
Obr. 4: Poloha studovaných jezer v pohoří Cordillera Blanca	40
Obr. 5: Jezero Palcacocha a jeho základní charakteristiky	42
Obr. 6: Jezero Arhueycocha a jeho základní charakteristiky	44
Obr. 7: Jezero Llaca a jeho základní charakteristiky	45
Obr. 8: Jezero Jancarurish a jeho základní charakteristiky	47
Obr. 9: Jezero Quitacocha a jeho základní charakteristiky	49
Obr. 10: Jezero Tararhua a jeho základní charakteristiky	50
Obr. 11: Jezero Rajucolta a jeho základní charakteristiky	52
Obr. 12: Schematický vztah klimatických oscilací, stáří morénových hrází a frekvence povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer	66
Obr. 13: Schematický vztah spolehlivost ohodnocení potenciální nebezpečnosti a náročnosti na vstupní data	67
Obr. 14: Schematický vztah prostorové a časové spolehlivosti předpovědi	68

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Použití metod hodnocení potenciální nebezpečnost morénami hrazených jezer	17
Tab. 2: Posuzované charakteristiky (parametry) u jednotlivých metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer	23
Tab. 3: Potenciální nebezpečnost morénami hrazených jezer podle O'Connor et al., (2001)	24
Tab. 4: Zvolené charakteristiky pro hodnocení potenciální nebezpečnosti ledovcových jezer podle Huggel et al. (2004)	26
Tab. 5: Hodnoty pro odečtení potenciální nebezpečnosti podle Reynolds (2003)	26
Tab. 6: Kritické hodnoty parametrů pro hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezera podle Wang et al. (2008)	27
Tab. 7: Analyzované charakteristiky podle McKillop & Clague (2007a,b)	29
Tab. 8: Váhy jednotlivých parametrů a hraniční hodnoty pro jejich zařazení do kategorií podle Wang et al. (2011)	30
Tab. 9: Hodnocené charakteristiky, jejich kritické hodnoty a bodové ohodnocení podle Mergili & Schneider (2011)	31
Tab. 10: Celková náchylnost k uvolnění akumulované vody z jezera podle Mergili & Schneider (2011)	31
Tab. 11: Základní charakteristiky studovaných jezer	40
Tab. 12: Vývoj jezera Palcacocha od tzv. „malé doby ledové“ (LIA)	41
Tab. 13: Vývoj jezera Jancarurish od tzv. „malé doby ledové“ (LIA)	46
Tab. 14: Vývoj jezera Rajucolta od tzv. „malé doby ledové“ (LIA)	51
Tab. 15: Zohlednění pěti skupin regionálně specifických charakteristik jednotlivými metodami	54
Tab. 16: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle metodiky, kterou představil O'Connor et al. (2001)	55
Tab. 17: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle metodiky, kterou představili Costa & Schuster (1988)	56
Tab. 18: Potenciální nebezpečnost studovavných jezer podle metodiky, kterou představil Yamada (1993)	56

Tab. 19: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle metodiky, kterou prezentovali Clague & Evans (2000)	57
Tab. 20: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle metodiky, kterou představili Grabs & Hanisch (1993)	57
Tab. 21: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle upravené metodiky, kterou prezentoval Wang et al. (2008)	58
Tab. 22: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle upravené metodiky, kterou prezentoval Reynolds (2003)	59
Tab. 23: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle upravené metodiky, kterou představil Huggel et al. (2004)	60
Tab. 24: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle metodiky, kterou představil Wang et al. (2011)	60
Tab. 25: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle upravené metodiky, kterou představili Mergili & Schneider (2011)	61
Tab. 26: Aritmetický a vážený průměr výsledků hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer	62
Tab. 27: Aritmetický a vážený průměr výsledků hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer čtyřmi nejvhodnějšími metodami	63
Tab. 28: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer na základě nově vytvořené kvalitativní metody	64
Tab. 29: Pozitiva a negativa jednotlivých metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer	69

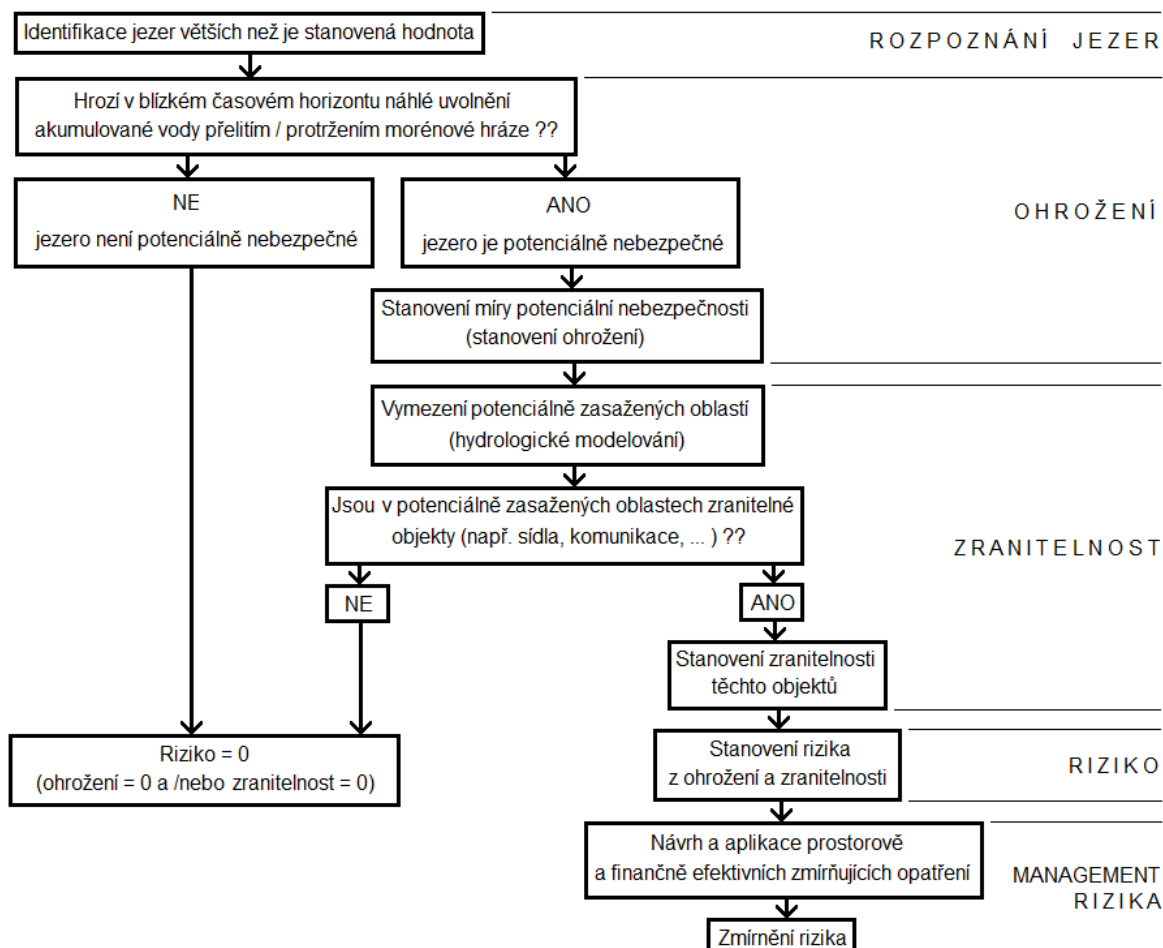
Kapitola 1

ÚVOD

V současné době tzv. globální klimatické změny, a s ní spojené deglaciace většiny světových velehorských oblastí, dochází ke vzniku a dynamickému vývoji všech typů potenciálně nebezpečných ledovcových jezer (O'Connor & Costa, 1993; Georges, 2004; Korup & Tweed, 2007) a ani nejzaledněnější peruánské pohoří – Cordillera Blanca – v tomto nepředstavuje výjimku (Portocarerro, 1990; Ames & Francou, 1995; Vilímek et al., 2005b). Protože tato relativně mladá a často také nestabilní jezera reprezentují reálnou a aktuální hrozbu pro obyvatele, existují určité tendence nějakým způsobem tuto hrozbu objektivně vyhodnotit – kvantifikovat ohrožení. Richardson & Reynolds (2000) vymezují obecně v managementu ledovcového ohrožení tři fáze: 1) rozpoznání potenciální hrozby; 2) sledování a vyhodnocení potenciálního ohrožení; 3) výběr a aplikace zmírňujících opatření. Efektivnost třetí fáze je přímo závislá na kvalitě provedení prvních dvou fází. Tato práce se věnuje první a druhé fázi tohoto procesu pro morénami hrazená jezera, tzn. identifikaci potenciálně nebezpečných jezer v pohoří Cordillera Blanca, respektive stanovení potenciální nebezpečnosti sedmi vybraných jezer v tomto pohoří (viz 1.1).

V případě morénou hrazeného jezera je zásadním krokem při hodnocení jeho potenciální nebezpečnosti objektivní stanovení možnosti náhlého uvolnění vody akumulované v jezeře. Tato otázka je velmi komplexní. K náhlému uvolnění akumulované vody může dojít jednak protržením hráze, ale také jejím přelitím tzv. nárazovou vlnou, například po dynamickém svahovém pohybu do jezera (Costa & Schuster, 1988; Clague & Evans, 2000). Jsou-li spolehlivě identifikována nebezpečná jezera (taková, ze kterých může dojít k náhlému uvolnění významného objemu vody), následuje vymezení potenciálně zasažených oblastí (např. hydrodynamické modelování (Worni et al., 2012)) a rozpoznání ohrožených prvků (Hegglin & Huggel, 2008; Richardson, 2010). V ideálním případě pak, s přihlédnutím k možným příčinám a mechanismům uvolnění akumulované vody, následuje aplikace prostorově a finančně efektivních zmírňujících opatření (aktivních či pasivních)(Ives et al., 2010; Shrestha, 2010)(viz Obr. 1).

Obr. 1: Obecné idealizované schema procesu managementu rizika vázaného na morénami hrazená jezera (podle: Hegglin & Huggel, 2008; Ives et al., 2010; Richardson, 2010; Shrestha, 2010).



Pro náhlé uvolnění akumulované vody z ledovcového jezera (jezero hrazené ledovcem, jezero hrazené morénou, jezero hrazené skalním stupněm) bez ohledu na příčinu je používán termín „GLOF“ (glacial lake outburst flood)(Benn & Evans, 1998; Richardson & Reynolds, 2000). Tento fenomén byl zaznamenán a popsán ve velehorských oblastech celého světa: v Himalájích (Kattelmann & Watanabe, 1997; Yamada, 1998; Quincey et al., 2007; Bajracharya et al., 2007), pohoří Karakoram (Hewitt, 1982), Hindu-Kush (Iturrizaga, 2005; Mool et al., 2010; Ives et al., 2010), Tian-Shan (Janský et al., 2010; Narama et al., 2010, Bolch et al., 2011; Engel et al., 2012), Pamir (Mergili & Schneider, 2011), na Kavkaze (Petrakov et al., 2007), v peruánských Andách (Reynolds, 2003; Vilímek et al., 2005a,b; Carey et al., 2012), Patagonii (Harrison et al., 2006; Dussillant et al., 2009), pohoří Cascade Range (O'Connor et al., 2001), Britské Kolumbii (Clague & Evans, 2000; Kershaw et al., 2005), evropských Alpách (Haeberli et al., 2001; Huggel et al., 2002) i Skandinávii (Breien et al., 2008).

1.1 Cíle a struktura práce

Práce má dva hlavní cíle, kterým je současně podřízena také její struktura:

1) Zhodnocení potenciální nebezpečnosti vybraných morényami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca (stanovení možnosti náhlého uvolnění vody akumulované v těchto jezerech)

Díličními cíly této části práce je:

- **shrnutí současných metodických přístupů** k této problematice, a to formou rešerše odborné literatury (viz Kapitola 3)
- **zisk relevantních vstupních dat** pro vlastní zhodnocení potenciální nebezpečnosti. Jedná se především o data získaná analýzou leteckých a družicových snímků, data z nepublikovaných výzkumných zpráv archivu institutu ANA (Huaráz) a data získaná při terénním výzkumu (podrobněji viz 2.2). Studovaná jezera a jejich charakteristiky (vstupní data pro hodnocení jejich potenciální nebezpečnosti) pak jsou detailněji popsána v části 4.3
- **aplikace vybraných metodických přístupů** k hodnocení potenciální nebezpečnosti na sedm studovaných jezer a porovnání jejich výsledků. Výsledky hodnocení jsou prezentovány v části 5.2
- **tvorba nové kvalitativní metody** hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer (viz 3.3) a následné zhodnocení studovaných jezer také touto novou metodou (viz 5.2.4)

2) Analýza vhodnosti současných metodických přístupů k hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer pro jezera v pohoří Cordillera Blanca

Díličními cíly této části práce je:

- charakteristika zájmového pohoří Cordillera Blanca (viz Kapitola 4) s důrazem na **identifikaci regionálních specifíků** potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer v této oblasti (viz 4.2)
- **vhodnost současných metodických přístupů** je analyzována na základě (ne)zohlednění pěti skupin klíčových parametrů, které odrážejí regionální specifika morényami hrazených jezer a povodní typu GLOF v pohoří Cordillera Blanca (viz 5.1)

Podstatnou částí práce pak je diskuse, ve které je jednak diskutována obecně problematika hodnocení možnosti náhlého uvolnění vody akumulované v morénou

hrozeném jezeře (viz 6.1), dále jednotlivé metody hodnocení (viz 6.2), vhodnost těchto metod pro jezera v pohoří Cordillera Blanca (viz 6.3) a vlastní výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti sedmi studovaných jezer (viz 6.4).

Kapitola 2

METODOLOGIE PRÁCE A ZDROJE DAT

2.1 Metodologie práce

Práce je členěna do dvou částí, které reflektují hlavní cíle práce (viz 1.1). První část práce má rešeršní charakter a shrnuje současné přístupy a jednotlivé metody hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer (stanovení možnosti náhlého uvolnění akumulované vody potenciálně katastrofickým způsobem v blízkém časovém horizontu). Tato část práce vychází z odborných vědeckých článků publikovaných v tematicky zaměřených periodikách a dále z monografií (viz 2.2).

Ve druhé části práce pak jsou aplikovány vybrané metody hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer na sedm zájmových jezer v pohoří Cordillera Blanca. Jedná se o jezera Palcacocha, Jancarurish, Rajucolta, Llaca, Quitacocha, Tararhua a Arhueycocha. Tato jezera byla zvolena na základě následujících kritérií:

A) Rozličné kombinace charakteristik u jednotlivých jezer – toto kritérium je důležité z hlediska podchycení co možná nejširší škály různých možností stavů jezer a tím jejich potenciální nebezpečnosti, což může poukázat na charakteristiky, případně kombinace, které (ne)jsou jednotlivé metody schopny zohlednit.

B) Dostupnost a aktuálnost dat – dostupnost relevantních dat pro dané jezero je klíčové kritérium, bez kterého nelze provést zhodnocení potenciální nebezpečnosti. K hodnocení potenciální nebezpečnosti byla v této práci zvolena jezera, o kterých jsou dostupné písemné prameny a která mají nejvýše tři roky starý snímek DPZ.

C) Velikost – k hodnocení potenciální nebezpečnosti byla vybrána jezera, která jsou v rámci pohoří Cordillera Blanca řazena mezi velká (objem zadržované vody přesahuje 10^6 m^3). Jedinou výjimku tak představuje jezero Llaca, které bylo, navzdory objemu $0,274 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (údaj pouze za dolní pánev jezera; viz 4.3.3), mezi hodnocená jezera

zařazeno, a to především díky značnému růstovému potenciálu, kterým toto jezero do budoucna disponuje.

Aplikace vybraných metod potenciální nebezpečnosti na sedm studovaných jezer byla ve většině případů provedena na základě originálních metodických postupů. Ty jsou podrobně popsány v rešeršní části práce (viz 3.1 a 3.2). Některé z původních metodických postupů však nebylo možné použít, a to především kvůli:

- i) příliš velké přístrojové, časové či finanční náročnosti na vstupní data;
- ii) nedostatečně definovaným metodickým postupům;
- iii) příliš velké míře subjektivní složky při vlastním hodnocení.

Z těchto důvodů byly některé originální metodické postupy částečně upraveny (viz Tab. 1). Jedná se o metody, které prezentovali Reynolds (2003), Huggel et al. (2004), Wang et al. (2008), a Mergili & Schneider (2011). Konkrétní poznámky k použití a úpravám jednotlivých metod jsou popsány dále (viz 2.1.1 a 2.1.2). Metoda, kterou prezentovali McKillop & Clague (2007a,b) pak, jako jediná ze shrnutých metod, nebyla použita vůbec, a to z důvodu přílišné náročnosti na vstupní data, byla však použita její část popisující stanovení (ne)přítomnosti čoček pohřbeného ledu v tělese hráze pouze na základě morfologie morény hodnotitelné ze snímků DPZ (viz 3.2).

Tab. 1: Použití metod hodnocení potenciální nebezpečnost morénami hrazených jezer

Autoři metody	Použití metody	Poznámka k použití metody
O'Connor et al. (2001)	Ano	Podle originálního metodického postupu
Costa & Schuster (1988)	Ano	Podle originálního metodického postupu
Yamada (1993)	Ano	Podle originálního metodického postupu
Clague & Evans (2000)	Ano	Podle originálního metodického postupu
Grabs & Hanisch (1993)	Ano	Podle originálního metodického postupu
Wang et al. (2008)	Ano	Vynechána charakteristika „rozloha mateřského ledovce“ (nebyla stanovena kritická hodnota)
Reynolds (2003)	Ano	Vynechána charakteristika „složené nebezpečí“
Huggel et al., (2004)	Ano	Úprava odečtu celkové potenciální nebezpečnosti
Wang et al. (2011)	Ano	Podle originálního metodického postupu
Mergili & Schneider (2011)	Ano	Nahrazení indexu topografické susceptibility (TSI) a maximálního zrychlení při zemětřesení (PGA) expertním posouzením
McKillop & Clague (2007a,b)	Ne	Metoda nebyla použita z důvodu přílišné náročnosti na vstupní data

2.1.1 Použití kvalitativních metod

Z Kvalitativních metod bylo použito všech osm metod shrnutých v části 3.1. Všechny tyto metody jsou založeny na identifikaci charakteristik indikujících zvýšenou potenciální nebezpečnost daného jezera. Různí autoři hodnotí různý počet charakteristik, přičemž nejméně se jedná o dvě charakteristiky v metodě, kterou prezentovali O'Connor et al. (2001) a nejvíce o jedenáct charakteristik v metodě, kterou prezentovali Grabs & Hanisch (1993). Hodnocené charakteristiky zpravidal mívají dvě varianty – variantu s nižším a vyšším negativním vlivem na možnosti náhlého uvolnění akumulované vody z daného jezera. Výsledná potenciální nebezpečnost je tedy v každé metodě vyjádřena součtem dosažených „negativních“ bodů (bodů s vyšším negativním vlivem na možnost náhlého uvolnění akumulované vody), tzn. že všechny hodnocené charakteristiky mají stejnou váhu. Aby byly mezi sebou porovnatelné výsledky jednotlivých metod, které hodnotí odlišný počet charakteristik, je vždy potenciální nebezpečnost studovaných jezer vyjádřena také na škále 0-1 (dosažený počet negativních bodů vztahený k celkovému možnému počtu dosažených negativních bodů (počtu hodnocených charakteristik)). Tento postup byl použit u metod, které prezentovali Costa & Schuster (1988); Grabs & Hanisch (1993), Yamada (1993), Clague & Evans (2000) a O'Connor et al. (2001).

Úpravy zbylých třech kvalitativních metod, oproti originálním metodickým postupům popsaným v části 3.1, pro použití v této práci byly následující:

- Wang et al. (2008) – v této metodě je hodnoceno devět charakteristik, u kterých je uvedena kritická hodnota. Jedinou výjimku představuje charakteristika „rozloha mateřského ledovce“, u které kritická hodnota uvedena není. Tato charakteristika tak nebyla zahrnuta do vlastního hodnocení potenciální nebezpečnosti. Ta je tak v této metodě vyjádřena na škále 0-8 bodů.
- Reynolds (2003) – původní metoda je založena na bodovém ohodnocení osmi charakteristik. Každá z těchto charakteristik může podle vlivu na náhlé uvolnění akumulované vody z jezera dosáhnout 0 až 50 bodů (žádný – 0 b.; nízký – 2 b., střední – 10 b., vysoký – 50 b. vliv). Jelikož však nejsou stanoveny žádné hraniční (kritické) hodnoty pro přidělování těchto bodů, metoda je zatížena velkou mírou subjektivity. Bodové hodnoty tak byly přiřazeny na základě vlastního posouzení vztahenému k příkladu jezera Llaca prezentovanému v originální výzkumné zprávě. Rovněž byla vynechána zcela subjektivní charakteristika „složené nebezpečí“. V této práci je tedy hodnoceno sedm charakteristik, přičemž každá může dosáhnout 0-50 bodů. Celková potenciální nebezpečnost daného jezera je tak vyjádřena na škále 0-350 b.
- Huggel et al. (2004) - každá z pěti hodnocených charakteristik má tři varianty podle vlivu na možnost náhlého uvolnění akumulované vody (nízký x střední x vysoký). Podle

původní metodiky celková nebezpečnost jezera odpovídá nejvyššímu ze tří stupňů dosažených u jednotlivých hodnocených charakteristik. Není však již rozlišeno, zda tohoto hodnocení bylo dosaženo u jedné, či více charakteristik (viz 3.1). Z toho důvodu bylo slovní hodnocení, které má pouze tři varianty, nahrazeno v této práci hodnocením bodovým (0 b. nízký; 1 b. střední a 2b. vysoký vliv na možnost náhlého uvolnění akumulované vody). Maximální zisk odpovídající nejvyšší potenciální nebezpečnosti daného jezera tak je 10 b. (2b. x 5 charakteristik), naopak minimum je 0 b.

2.1.2 Použití kvantitativních metod

Ze tří metod, které byly charakterizovány jako kvantitativní (viz 3.2) byly pro hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer použity pouze dvě, a to metody, které prezentovali Mergili & Schneider (2011) a Wang et al. (2011). Rovněž u kvantitativních metod byly výsledky, kvůli možnosti porovnání, vyjádřeny na škále 0-1. Metoda, kterou představili Wang et al. (2011) byla použita podle originální metodiky popsané v rešeršní části práce. Metoda, kterou prezentovali Mergili & Schneider (2011), byla použita s následujícími úpravami:

- Mergili & Schneider (2011) - v původní metodě index topografické susceptibility (TSI - náchylnost okolí k dynamickým svahovým pohybům) počítaný v GIS byl nahrazen expertním posouzením možnosti dynamického svahového pohybu do jezera a rovněž vypočtené maximální zrychlení při zemětřesení PGA bylo odvozeno na základě historických událostí (zemětřesení v roce 1970; M7.7 (Evans & Clague; 1994)). Změny plochy jezer byla vztažena k satelitním snímkům z roku 1970.

2.1.3 Zohlednění regionálních specifík pohoří Cordillera Blanca

Na základě (ne)zohlednění pěti skupin charakteristik (viz 4.2), které odrážejí regionální specifika pohoří Cordillera Blanca a které je tedy žádoucí určitým způsobem zohlednit při hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer v této oblasti, je analyzována vhodnost jednotlivých metod (viz 5.1). Pět skupin charakteristik bylo stanoveno na základě předchozích výzkumů, především pak na základě analýzy historických událostí povodní typu GLOF ve studované oblasti.

2.1.4 Tvorba nové kvalitativní metody

Nová kvalitativní metoda byla vytvořena na základě syntézy všech nepřekrývajících se kvalitativně hodnotitelných charakteristik ze všech shrnutých metod. Podrobnější popis metody viz 3.3. Potenciální nebezpečnost studovaných jezer byla vyhodnocena rovněž na základě této metody (viz 5.2.4).

2.2 Zdroje dat

Kvalitní a relevantní data a informace jsou jedním ze základních předpokladů smysluplného a spolehlivého ohodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer. Data a informace pro tuto práci byla získána ze šesti hlavních zdrojů (viz níže A-F). Pro rešeršní část práce se jedná o body A) a B), vstupní data pro vlastní hodnocení potenciální nebezpečnosti sedmi studovaných morénami hrazených jezer pocházejí z datových zdrojů C) až F) a jsou kompletně shrnuta v části 4.3.

A) Odborné vědecké články – klíčovým zdrojem dat pro rešeršní část práce jsou odborné vědecké články. Jedná se převážně o články publikované v zahraničních periodikách s IF (Impact factor), například vydavatelstvím Elsevier (Geomorphology, Quaternary Science Reviews, Global and Planetary Change, atd.), Springer (Natural hazards, Landslides, International Journal of Disaster Risk Science, atd.), Copernicus (Natural Hazards and Earth System Sciences), dále samostatně vycházející periodika, či periodika vydávaná národními službami a vědeckými společnostmi, například Annals of Glaciology, Journal of Glaciology, Canadian Geotechnical Journal, či Mountain Research and Development. Citována jsou však také domácí periodika – univerzitní AUC Geographica a Geografie.

B) Monografie – jedná se především o publikace, které vydaly International Association of Hydrological Sciences (IAHS), U.S. Geological Survey (USGS), International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Japanese Society of Snow and Ice a další organizace, vědecké společnosti či pracoviště.

C) Nepublikované výzkumné zprávy z archivu Autoridad Nacional del Agua (Huaraz) – pracoviště ANA v Huarázu produkuje poměrně velké množství výzkumných zpráv, které však zpravidla nebývají publikované v mezinárodně dostupných databázích a končí pouze v archivu tohoto institutu. Při pobytu na tomto pracoviště v květnu / červnu 2012 bylo získáno více než 2 500 stran materiálů, které se problematikou potenciální nebezpečnosti ledovcových jezer v pohoří Cordillera Blanca zabývají. Jedná se o podrobné popisné zprávy z pravidelných kontrolních návštěv jezer, geomorfologicko-glaciologické výzkumné zprávy, plány stavebně-technických úprav realizovaných u vybraných jezer, batymetrické mapy a výroční zprávy činnosti institutu. Tento zdroj dat postihuje období zhruba od 40. let minulého století.

D) Data dálkového průzkumu Země (DPZ) - podstatným a v dnešní době prakticky nepostradatelným zdrojem dat a informací jsou snímky dálkového průzkumu Země (DPZ), tedy letecké a družicové snímky. Ty jsou z velké části schopné nahradit přímý terénní výzkum, a to při minimalizaci časových a finančních nákladů. Letecké snímky jsou velmi cenným zdrojem dat a informací především pro minulost (v pohoří Cordillera Blanca první kompletní nasnímání oblasti z roku 1948). Novější letecké snímky je pak možné získat od USGS, případně od peruánských institucí. Oproti tomu u družicových snímků je pro zhodnocení současného stavu rozhodující jejich aktuálnost. Google Earth poskytuje kompletní oblast pohoří Cordillera Blanca nasnímkanou z roku 1970. Aktuálnější snímky jsou pro různé části pohoří z jiného období. Hodnocená jezera Tararhua, Rajucolta a Palcacocha mají nejaktuálnější družicový snímek volně dostupný na Google Earth z května 2012, jezero Llaca z července 2011 a jezera Jancarurish, Quitacocha a Arhueycocha ze srpna 2012. Tyto snímky byly použity pro získání části dat pro vlastní hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer.

E) Terénní průzkum – v květnu / červnu 2012 byly rovněž realizovány terénní práce a sběr dat u vybraných morényami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca (jezera Llaca a Palcacocha).

F) Osobní komunikace se zaměstnanci institutu Anthoridad National de Agua, Huaráz – některé velmi aktuální a nebo specifické informace pocházejí z osobního kontaktu se zaměstnanci institutu ANA (vedoucí oddělení glaciologie Ing. A. Cochachin a bývalý vedoucí téhož oddělení Ing. Marco L. Zapata)

Kapitola 3

METODY HODNOCENÍ POTENCIÁLNÍ NEBEZPEČNOSTI MORÉNAMI HRAZENÝCH JEZER

Tato kapitola shrnuje současné metody hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer. Jedná se tedy o metody, jejichž výsledky poskytují informaci o předpokladech daného jezera k náhlému uvolnění akumulované vody. Celkem je shrnuto a popsáno jedenáct metod. Ty jsou rozděleny do dvou kategorií: 1) kvalitativní metody (viz 3.1); a 2) kvantitativní metody (viz 3.2). První kategorie zahrnuje takové metody, které v sobě nesou určitou subjektivní složku, tzn. takové metody, které v případě shodných vstupních dat mohou různým hodnotitelům poskytnout odlišné výsledky, a to právě v důsledku více či méně subjektivního posouzení těchto dat. Druhá kategorie (kvantitativní metody) pak zahrnuje metody, které výrazným způsobem subjektivní složku v hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer eliminují, například jasným definováním kritických hodnot, numerickými výpočty, či využitím statistických metod.

Všechny metody však jsou založené na hodnocení určitých charakteristik, ať už se jedná o charakteristiky samotné morénové hráze, mateřského ledovce či blízkého okolí jezera. Tyto charakteristiky (parametry; aspekty stability) jsou obvykle stanoveny autory dané metody na základě jejich vlastního úsudku a zkušenosti, v některých případových studiích také s přihlédnutím k regionálním specifikům studované oblasti. Některé charakteristiky se mezi jednotlivými metodami vyskytují častěji než jiné. Mezi nejfrekventovanější patří charakteristiky vypovídající o možnosti dynamického svahového pohybu do jezera (např. vzdálenost ledovce od jezera, sklon svahů morén obklopujících jezero, ...), dále charakteristiky popisující geometrii morénové hráze (např. poměr šířky ku výšce, převýšení hráze, ...) a charakteristiky popisující vnitřní strukturu tělesa hráze (např. průsak hráze či přítomnost čoček pohřbeného ledu). Všechny hodnocené charakteristiky pak jsou shrnuty v Tabulce 2.

Tab. 2: Posuzované charakteristiky (parametry) u jednotlivých metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer

Hodnocená charakteristika	Metoda											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vzdálenost jezera od čela ledovce	X			X	X		X	X		X	X	X
Sklon svahu mezi ledovcem a jezerem										X		X
Rozloha mateřského ledovce								X		X		X
Sklon koncové části ledovce				X				X		X		X
Přítomnost hlubokých trhlin na ledovci			X	X								X
Postup ledovce				X								X
(poměr) převýšení hráze	X		X	X		X	X	X			X	X
Poměr šířky ku výšce hráze			X			X		X	X			
Přítomnost čóček pohřbeného ledu v tělese hráze		X		X	X		X	X	X			X
Průsak hráze			X	X			X				X	X
Sklon vnějších svahů hráze		X						X		X	X	X
Hlavní horniny tvořící morénu									X			
Vegetační kryt morény		X										X
Šířka hráze v koruně								X				X
Důkazy předchozích GLOFs				X								X
Změna rozlohy jezera											X	X
Objem zadržované vody / rozloha					X		X		X			X
Seismická aktivita											X	
Potenciálně nebezpečná jezera situovaná výše proti proudu							X					X
Hydrometeorologická situace						X		X				
Složené nebezpečí							X					
Náchylné okolí k dynamickým svahovým pohybům		X			X	X					X	
Možnost pádu odlomených bloků ledovce do jezera			X				X					X
Možnost sesuvů bočních morén / skalního říčení do jezera			X	X								X
Typ hráze						X					X	
Erodovatelnost výtoku			X									X
Konsolidace morény hradící jezero				X								

1 – O'Connor et al. (2001); 2 – Costa & Schuster (1988); 3 – Clague & Evans (2000); 4 – Grabs & Hanisch (1993); 5 – Yamada (1993); 6 – Huggel et al. (2004); 7 – Reynolds (2003); 8 – Wang et al. (2008); 9 – McKillop & Clague (2007a); 10 – Wang et al. (2011); 11 – Mergili & Schneider (2011); 12 – metoda prezentovaná v této práci (viz 3.3)

3.1 Kvalitativní metody

Do této skupiny metod spadají všechny metody, které určitým subjektivním způsobem posuzují potenciální nebezpečnost morénami hrazených jezer na základě vybraných charakteristik. Autoři zpravidla jmenují charakteristiky, které indikují zvýšenou nebezpečnost morénou hrazeného jezera. Celkem osm metod bylo zařazeno do této kategorie, a to metody, které prezentovali: O'Connor et al. (2001); Costa & Schuster (1988); Clague & Evans (2000); Grabs & Hanisch (1993); Yamada (1993), Huggel et al. (2004); Reynolds (2003) a Wang et al (2008).

- **O'Connor et al. (2001)** představili velmi jednoduchou metodu hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer. V této metodě jsou zohledněny pouze dvě charakteristiky, a to: 1) přímý kontakt jezera s ledovcem; a 2) převýšení hráze (vertikální vzdálenost hladiny vody v jezeře a nejnižšího bodu hřebene hráze). Každý z těchto parametrů má pouze dvě varianty (ano x ne pro blízký kontakt jezera s ledovcem; vysoké x nízké pro převýšení hráze). Celkem tedy existují čtyři kombinace a tři úrovně potenciální nebezpečnosti daného jezera (viz Tab. 3).

Tab. 3: Potenciální nebezpečnost morénami hrazených jezer podle O'Connor et al., (2001)

Přímý kontakt jezera s ledovcem	Převýšení hráze	Potenciální nebezpečnost
Ne	Vysoké	Nízká
Ne	Nízké	Střední
Ano	Vysoké	Střední
Ano	Nízké	Vysoká

- **Costa & Schuster (1988)** považují za potenciálně nebezpečné takové morénové hráze, které: 1) jsou relativně mladé (vznik od tzv. malé doby ledové) a zároveň situované ve velkých nadmořských výškách, což znemožňuje stabilizaci jejich svahů vegetačním pokryvem; 2) mají příkré svahy; 3) obsahují čocky pohřbeného ledu, který může odtávat a negativně tak působit na strukturální integritu tělesa hráze; 4) jsou v blízkosti potenciálních svahových pohybů (skalní řícení, sesuvy, pád odlomených bloků ledu z ledovce), které by při pádu do jezera vyvolaly nárazovou vlnu.

- **Clague & Evans (2000)** prezentovali šest charakteristik, které indikují zvýšenou potenciální nebezpečnost morénou hrazeného jezera. Jedná se o: 1) malý poměr šířky

ku výšce hráze; 2) nezpevněné odtokové koryto (možnost jeho eroze); 3) odvodňování jezera průsakem skrz hráz; 4) nízké převýšení hráze po většinu roku; 5) přítomnost ledovce s množstvím trhlin nad jezerem; 6) náchylné okolí jezera k dynamickým horninovým svahovým pohybům. Jeden nebo kombinace výše uvedených faktorů pak svědčí o zvýšené potenciální nebezpečnosti daného jezera.

- **Grabs & Hanisch (1993)** uvádějí, že indikátory potenciálně nebezpečných morénami hrazených jezera jsou: 1) zahrazení jezera mladou, nekonsolidovanou morénou; 2) přímý kontakt jezera s ledovcem; 3) postup ledovce; 4) příkrý konec ledovcového splazu; 5) přítomnost velkého počtu hlubokých trhlin na ledovci; 6) příkré a nekonsolidované svahy bočních morén náchylné ke svahovým pohybům; 7) vysoká hladina vody v jezeře (nízké převýšení hráze); 8) průsak vody skrz hráz; 9) záznamy dřívějších povodní typu GLOF z daného jezera; 10) možnost sesuvu / řícení v okolí jezera; a 11) přítomnost čoček pohřbeného ledu v tělese hráze a možnost jejich odtávání.

- **Yamada (1993)** primárně identifikuje potenciálně nebezpečná morénami hrazená jezera v oblasti nepálského Himaláje na základě čtyřech indikátorů, které lze posuzovat na základě snímků DPZ. Jedná se o: 1) degradaci tělesa hráze v důsledku odtávání pohřbeného ledu; 2) plochu jezera, respektive objem zadržované vody; 3) telení ledovce do jezera (přímý kontakt jezera s ledovcem); 4) příkré svahy v okolí jezera (možnost potenciálních svahových pohybů do jezera)

- **Huggel et al. (2004)** vyhodnocují potenciální nebezpečnost všech typů ledovcových jezer v oblasti Švýcarských Alp na základě pěti vybraných charakteristik, kterými jsou: 1) typ hráze jezera; 2) poměr převýšení hráze ku její výšce; 3) poměr šířky ku výšce hráze; 4) výskyt extrémních meteorologických událostí; 5) výskyt nárazových vln (viz Tab. 4). Kromě typu hráze (jezero hrazené ledovcem x jezero hrazené morénou x jezero hrazené skalím stupněm) a poměru šířky ku výšce hráze jsou všechny tyto charakteristiky posuzovány subjektivně. Možnost náhlého uvolnění akumulované vody je pro každou charakteristiku zvlášť klasifikována jako nízká, střední nebo vysoká. Celková možnost náhlého uvolnění akumulované vody pak také může být nízká, střední nebo vysoká a to podle nejvyšší dosažené hodnoty u libovolného / libovolných z aspektů. Tuto metodu rovněž použil Janský et al. (2010) pro hodnocení potenciální nebezpečnosti jezer v oblasti kyrgyzského Tian-Shanu. Také Hegglin & Huggel (2008) vycházejí z této metodiky při hodnocení možnosti vzniku povodně z jezer v oblasti pohoří Cordillera Blanca, ovšem zohledňují navíc způsob odtoku vody z jezera a stavebně-technické úpravy hráze (tato metoda však není podrobněji popsána).

Tab. 4: Zvolené charakteristiky pro hodnocení potenciální nebezpečnosti ledovcových jezer podle Huggel et al. (2004)

Charakteristika	Alternativy		Vliv na možnost náhlého uvolnění akumulované vody
Typ hráze	Horninové podloží		Nízký
	Morénová	Bez pohřbeného ledu	Střední
		S pohřbeným ledem	Vysoký
	Ledovcová		Vysoký
Poměr převýšení ku výšce hráze	Vysoké		Nízký
	Střední		Střední
	Nízké		Vysoký
Poměr šířky ku výšce hráze	> 0,5		Nízký
	0,2 až 0,5		Střední
	0,1 až 0,2		Vysoký
Výskyt nárazových vln	Nikdy / malé objemy		Nízký
	Zřídka / střední objemy		Střední
	Často / velké objemy		Vysoký
Výskyt extrémních meteorologických událostí	Nikdy		Nízký
	Zřídka		Střední
	Často		Vysoký

• **Reynolds (2003)** určuje potenciálně nebezpečná morénami hrazená jezera v peruánském pohoří Cordillera Blanca na základě osmi parametrů. Jedná se o: 1) objem jezera; 2) možnost pádu odlomených bloků ledu při telení mateřského ledovce; 3) možnost pádu odlomených bloků ledu (ledových lavin) z visutého ledovce; 4) poměr převýšení ku výšce hráze; 5) průsak; 6) (ne)přítomnost pohřbeného ledu; 7) složené nebezpečí; 8) možnost povodňové vlny z výše položeného (ledovcového) jezera. Každý z výše uvedených parametrů je subjektivně bodově ohodnocen podle vlivu na možnost náhlého uvolnění akumulované vody z jezera (žádný – 0 b.; nízký – 2 b., střední – 10 b., vysoký – 50 b.). Celková potenciální nebezpečnost je pak určena počtem bodů dosažených za všech osm parametrů dohromady (viz Tab. 5), přičemž při hodnotách nad 100 bodů může náhlé uvolnění akumulované vody z jezera nastat „kdykoliv“.

Tab. 5: Hodnoty pro odečtení potenciální nebezpečnosti podle Reynolds (2003)

Celkový dosažený počet bodů	0	50	100	125	150<
Potenciální nebezpečnost	Žádná	Minimální	Střední	Vysoká	Velmi vysoká

• **Wang et al. (2008)** v případové studii dvou jezer v oblasti čínské části Himaláje, stanovují kritické hodnoty osmi z devíti charakteristik (viz Tab. 6), které považují za klíčové pro celou oblast Himaláje, respektive pro jakýkoliv region výskytu morénami hrazených jezer, přičemž částečně vychází z práce Lü (1999), které ovšem byla publikovaná pouze v čínštině. Jedná se o: 1) šířku hráze v koruně; 2) sklon vnějšího svahu morénové hráze; 3) přítomnost čoček pohřbeného ledu v tělese hráze; 4) poměr šířky ku výšce hráze; 5) rozlohu mateřského ledovce (kritická hodnota této charakteristiky není uvedena); 6) sklon koncových částí ledovcových splazů v blízkém okolí jezera; 7) chod teploty a srážek; 8) poměr převýšení ku výšce hráze; a 9) vzdálenost ledovce od jezera. Je-li u jezera překročena stanovená kritická hodnota, je potenciální nebezpečnost daného jezera klasifikována jako vysoká. Stanovením kritických hodnot sice částečně odpadá u této metody problém se subjektivností při hodnocení různými autory (vyjma hodnocení chodu teploty a srážek), nicméně stále se jedná o metodu, která je spíše charakterizovatelná jako kvalitativní či semi-kvantitativní.

Tab. 6: Kritické hodnoty parametrů pro hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezera podle Wang et al. (2008)

Charakteristika	Kritická hodnota	Reference
Šířka hráze v koruně	< 600 m	Lü et al., 1999
Sklon vnějšího svahu hráze	> 20°	Lü et al., 1999
Přítomnost pohřbeného ledu	ANO	Richardson & Reynolds, 2000
Poměr šířky ku výšce hráze	0,1 až 0,2	Huggel et al., 2004
Rozloha mateřského ledovce	Není uvedena	Lü et al., 1999
Sklon konce ledovcového splazu	> 8°	Lü et al., 1999
Teplota a srážky	Teplo + vlhko / teplo + sucho	Lü et al., 1999, Huggel et al., 2004
Poměr převýšení ku výšce hráze	0	WECS 1987
Vzdálenost jezera od ledovce	< 500 m	Lü et al., 1999

3.2 Kvantitativní metody

Celkem tři metody mohou byly klasifikovány jako kvantitativní, jedná se o metody, které prezentovali: McKillop & Clague (2007a,b); Wang et al. (2011) a Mergili & Schneider (2011).

• **McKillop & Clague (2007a,b)** ve své případové studii z oblasti Britské Kolumbie porovnávají 18 charakteristik (viz Tab. 7) u 175 morénami hrazených jezer větších 10 000 m², z nichž u 11 došlo v minulosti k náhlému uvolnění akumulované vody katastrofickým způsobem (k povodni typu GLOF). Těchto 18 charakteristik bylo u všech 175 jezer zjištěno pomocí dat DPZ (analýzy leteckých snímků metodou fotogrammetrie a analýza družicových snímků v prostředí GIS). Na základě regresní analýzy bylo porovnáním dat mezi jezery, u kterých došlo k náhlému uvolnění akumulované vody a jezery u kterých k němu nedošlo, stanoveno, že na náhlé uvolnění akumulované vody z morénou hrazeného jezera v oblasti Britské kolumbie mají vliv jen čtyři z osmnácti sledovaných charakteristik, a to: 1) rozloha jezera; 2) poměr výšky ku šířce hráze; 3) (ne)přítomnost pohřbeného ledu; 4) hlavní typ hornin tvořících morénu. Zároveň byly určeny i regresní koeficienty (váhy) jednotlivých parametrů. Celý tento postup je z principu replikovatelný i pro jiné oblasti.

Zajímavostí této metody je určování přítomnosti pohřbeného ledu analýzou určitých morfologických znaků morény z leteckých snímků, to znamená bez nutnosti terénního průzkumu, a to podle následujících kritérií: 1) Moréna s oblým povrchem s malými překrývajícími se hřebeny je vyhodnocena jako obsahující pohřbený led; 2) Neúměrně velký val koncové morény u malého ledovce je považován za obsahující pohřbený led; 3) Na průřezu úzké morény s ostrými hřebeny jsou naopak považovány za bezledé. Tento postup byl autory aplikován na zhruba polovinu všech jezer, u kterých nebyl znám stav této charakteristiky z předchozích výzkumů a mapování a terénní výzkum nepřipadal z finančních a časových možností v úvahu. Pro samotný výpočet pravděpodobnosti náhlého uvolnění vody akumulované v jezeře byl regresní analýzou stanoven vzorec:

$$P(Y=1)=\{1+\exp[-\alpha+\beta_1(\text{poměr šířky ku výšce hráze})+\sum\beta_j(\text{nepřítomnost pohřbeného ledu})+\beta_2(\text{rozloha jezera})+\sum\beta_k(\text{horniny tvořící morénu})]\}^{-1}$$

V tomto vzorci je α nezávislý člen, β_1 , β_2 , β_j , β_k jsou vypočítané regresní koeficienty. Poměr šířky ku výšce hráze a rozloha jezera mohou být přímo dosazeny do rovnice, v případě (ne)přítomnosti pohřbeného ledu je dosazena buď 1 (pohřbený led je přítomen), nebo 0 (není přítomen). Čtyřem možným typům hornin tvořících morénu je přiřazen vypočítaný koeficient, který je dosazen do vzorce. Výsledek do 6 % představuje velmi nízkou, od 6 % do 12 % nízkou, 12 % - 18 % střední, 18 % - 24 % vysokou a nad 24 % velmi vysoké předpoklady daného morénou hrazeného jezera k náhlého uvolnění akumulované vody.

Tab. 7: Analyzované charakteristiky podle McKillop & Clague (2007a,b)

Charakteristika	Jednotky	Reference
Převýšení hráze	m	Blown & Church, 1985
Poměr převýšení ku výšce hráze	-	Huggel et al., 2004
Rozloha jezera	ha	Chen et al., 1999
Poměr výšky ku šířce hráze	-	Clague & Evans, 2000; Huggel et al., 2002
Sklon vnějšího svahu morénové hráze	°	Chen et al., 1999
Vegetační pokryv	^	Costa & Schuster, 1988
(ne)přítomnost pohřbeného ledu	ANO/NE	Kattelmann, 2003
Horniny tvořící morénu	*	Blown & Church, 1985, McKillop & Clague, 2007a
Horizontální vzdálenost od čela ledovce	m	Ding & Liu, 1992; Chen et al., 1999
Vertikální vzdálenost od čela ledovce	m	Singerland & Voight, 1982
Sklon svahu mezi ledovcem a jezerem	°	Ding & Liu, 1992
(ne)přítomnost trhlin na čele ledovce	ANO/NE	Ding & Liu, 1992
Šířka telícího se ledovce	m	Lliboutry et al., 1977a; Richardson & Reynolds, 2000
Sklon koncové části ledovce	°	Alean, 1985
Výskyt lavin	ANO/NE	Ryder, 1998
Výskyt sesuvů do jezera	ANO/NE	Evans, 1987; Ryder, 1998
Výskyt nestabilních jezer výše proti proudu	ANO/NE	Huggel et al., 2003
Rozloha povodí jezera	ha	Clague & Evans, 1994

^ - hustota vegetace – kontinuální x diskontinuální

* - granitické x vulkanické x sedimentární x metamorfované

• **Wang et al. (2011)** hodnotí potenciál k protržení / přelití hráze daného jezera na základě pěti vybraných aspektů stability, přičemž opět částečně vychází z práce Lü (1999). Jedná se o případovou studii pro 78 vybraných morénami hrazených jezer v oblasti Tibetu. Byla stanovena čtyři kritéria pro výběr hodnocených parametrů: 1) proměnné měly být získatelné z dat DPZ; 2) bylo voleno z proměnných, které již byli někdy použity v hodnocení stability jezer této oblasti (podle Lü, 1999); 3) mělo by se jednat o spojité veličiny; 4) proměnné by na sobě měly být nezávislé. Tyto čtyři kritéria splnilo pět proměnných (charakteristik): 1) rozloha mateřského ledovce; 2) vzdálenost ledovce od jezera; 3) sklon svahu mezi jezerem a ledovcem; 4) sklon svahu morénové hráze; 5) sklon koncové části ledovcového splazu. Následujícím krokem bylo přiřazení vah jednotlivým proměnným. Za tímto účelem byla použita tzv. fuzzy consistent

matrix method (Yao & Zhang, 1997 in Wang et al., 2011), v kombinaci s dostupnými daty za některá z protržených jezer této oblasti. Jako nejdůležitější tak byl určena charakteristika „vzdálenost ledovce od jezera“ (váha 0,27)(viz Tab. 8). Dalším krokem bylo stanovení hraničních hodnot kategorií nebezpečnosti jednotlivých parametrů, a to podle statistické distribuce (kvartily, medián). Hodnota každé charakteristiky tak spadá do jedné ze čtyř stanovených kategorií (viz Tab. 8). Výsledek hodnocení potenciální nebezpečnosti pak je dán jako součet násobků hodnot nebezpečnosti daných charakteristiky (V) s jejich váhou (w). Výsledek výpočtu do 0,5 pak představuje nízký, 0,5 – 0,7 střední, 0,7 – 0,8 vysoký a nad 0,8 velmi vysoký potenciál k protržení / přelití hráze jezera.

Tab. 8: Váhy jednotlivých parametrů a hraniční hodnoty pro jejich zařazení do kategorií podle Wang et al. (2011)

Interval	I	II	III	IV	Váha (w)
Hodnota nebezpečnosti (V)	0,25	0,5	0,75	1	
Rozloha mateřského ledovce (km ²)	<0,5	0,5 - 1	1 – 2,5	>2,5	0,07
Vzdálenost ledovce od jezera (m)	>600	300 - 600	80-300	<80	0,27
Sklon svahu mezi jezerem a ledovcem (°)	<12	12 - 17	17 – 21	>21	0,22
Sklon svahu morénové hráze (°)	<10	10 - 14	14 – 22	>22	0,195
Sklon koncové části ledovcového splazu (°)	<14	14 - 19	19 – 26	>26	0,245

- **Mergili & Schneider (2011)** prezentovali regionálně zaměřenou metodu hodnocení potenciální nebezpečnosti všech typů jezer v oblasti Pamíru. Tato metoda je koncipována jako metoda, která vychází pouze z dat dálkového průzkumu Země. Je hodnoceno celkem osm charakteristik: 1) index topografické susceptibility (Topographic susceptibility index – náchylnost okolí jezera k dynamickým svahovým pohybům); 2) možnost telení ledovce do jezera (vzdálenost čela ledovce od jezera); 3) seismická aktivita (Peak ground acceleration index maximálního zrychlení při zemětřesení); 4) převýšení hráze; 5) materiál tvořící hráz; 6) převládající způsob odtoku vody z jezera (povrchový x průsak); 7) změna rozlohy jezera v čase (stagnace x růst); 8) sklon vnějších svahů hráze. První čtyři pro popis možnosti náhlého uvolnění akumulované vody v důsledku působení externích sil a zbývající čtyři pro náhlé uvolnění akumulované vody v důsledku interních sil. Pro všechny charakteristiky jsou stanoveny kritické hodnoty. Náchylnost k náhlému uvolnění akumulované vody je pro obě skupiny ohodnocena 0 až 4 body (-1; 0; 1 nebo 2 body pro každou hodnocenou charakteristiku)

(viz Tab. 9). Celková náchylnost k náhlému uvolnění akumulované vody z jezera pak je odečtena z matice jejich kombinace (viz Tab. 10).

Tab. 9: Hodnocené charakteristiky, jejich kritické hodnoty a bodové ohodnocení podle Mergili & Schneider (2011)

Charakteristika	Alternativy	Bodové ohodnocení
Náchylnost okolí k dynamickým svahovým pohybům (TSI)	Nízká ($TSI < 10$)	0
	Střední ($40 \geq TSI \geq 10$)	1
	Vysoká ($TSI > 40$)	2
Telení ledovce do jezera	Ne	0
	Ano	1
Seismická aktivita (maximální zrychlení PGA)	Nízká ($PGA < 500 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	0
	Vysoká ($PGA \geq 500 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	1
Převýšení hráze	Vysoké ($F > 25 \text{ m}$)	-1
	Nízké ($F \leq 25 \text{ m}$)	0
Materiál tvořící hráz	Skalní stupeň	0
	Velké sklaní bloky	0
	Suť	1
	Ledovec / moréna	2
Převládající způsob odtoku vody z jezera	Povrchový odtok	0
	Průsak	1
Změna rozlohy jezera v čase	Stagnace ($A1/A2 > 0,8$)	0
	Významný růst ($A1/A2 \leq 0,8$)	1
Vnější svahy hráze	Mírné ($\tan\beta < 0,02$)	-1
	Příkré ($\tan\beta \geq 0,02$)	0

Tab. 10: Celková náchylnost k uvolnění akumulované vody z jezera podle Mergili & Schneider (2011)

		Uvolnění akumulované vody v důsledku působení externích sil				
		0	1	2	3	4
Uvolnění akumulované vody v důsledku interních sil	0	0	1	2	3	4
	1	1	2	3	3	4
	2	2	3	3	4	5
	3	3	3	4	4	5
	4	4	4	5	5	6

3.3 Nová kvalitativní metoda

Nová kvalitativní metoda hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer byla vytvořena na základě syntézy charakteristik hodnocených ve stávajících metodách. Celkem je ve všech metodách hodnoceno 27 rozličných charakteristik (viz Tab. 2). Bylo vybráno 19 charakteristik tak, aby:

- 1) byly kvalitativně hodnotitelné; a
- 2) vzájemně se nepřekrývaly (např.: náchylné okolí jezera k dynamickým svahovým pohybům vs. možnost sesuvů / skalního říčení do jezera).

Každá hodnocená charakteristika přitom byla formulována tak, aby měla pouze dvě možné varianty (ano x ne), přičemž možnost „ano“ vždy představuje navyšování potenciální nebezpečnosti daného jezera. Všechny hodnocené charakteristiky tak mají stejnou váhu, nejdůležitější příčiny povodní typu GLOF jsou však popsány více charakteristikami. Například k možnosti pádu odlomených bloků ledovce do jezera, jakožto nejfrekventovanější příčině, je vázáno celkem šest charakteristik (viz Tab. 2). Tím je zajištěno zdůraznění této nejčastější příčiny povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer. Takto postavená kvalitativní metoda je počtem hodnocených charakteristik podstatně detailnější, než jakákoliv ze shrnutých metod (viz 3.1; 3.2), ve kterých bylo hodnoceno maximálně jedenáct charakteristik v případě metody, kterou prezentovali Grabs & Hanisch (1993).

Kapitola 4

CORDILLERA BLANCA

Pohoří Cordillera Blanca leží 300 km severně od peruánského hlavního města Limy, rozprostírá se na ploše přibližně 10 tisíc km² a je součástí většího orografického celku Cordillera Occidental (Západní Kordillera). Hlavní hřeben se táhne SZ-JV směrem v délce 180 km. Jedná se o pohoří vrásno-zlomového typu, které je převážně tvořeno granitovými intruzemi druhohorního a třetihorního stáří. Velehorských výšek však dosáhlo teprve na přelomu pliocénu a pleistocénu, kdy došlo k zahájení jeho výzdvihu, přičemž nadmořská výška nejvyšších vrcholů přesahuje šest tisíc metrů (celkem 16 vrcholů). Nejvyšším bodem je jižní vrchol masivu Huascarán, který je s 6 768 m n.m. zároveň nejvyšší horou Peru a celých tropických And. Tento výzdvih je přičítán konvergentnímu kontaktu oceánské desky Nazca s kontinentální deskou Jihoamerickou a jeho míra je stanovana na více než tisíc výškových metrů v průběhu kvartéru (Vilímek, 2002). Hlavní zlomové pásmo prochází paralelně s pobřežní linií po západních svazích celého pohoří v délce přibližně 200 km a měření na vybraných lokalitách dokazují aktivní pohyb. Ten však neprobíhá průběžně, nýbrž epizodicky, zpravidla spolu se změtřeseními (Košťák et al., 2002). Důležitou událostí při výzdvihu pohoří bylo překonání sněžné čáry (v kombinaci s jejím pohybem v důsledku klimatické změny) a následné zalednění.

Zásadní vliv na dnešní vzhled pohoří Cordillera Blanca mělo tedy především kvartérní střídání glaciálů s interglaciály. V reliéfu je možné identifikovat důkazy několika posledních postupů zalednění. Jedná se především o masivní morénové valy, trogy, či ledovcové ohlazy v místech výstupu částí horninového masivu k povrchu (viz Obr. 2). Tyto důkazy jsou místy vzdálené řádově kilometry od úrovně současného zalednění. Některé z těchto tvarů byly datovány, přičemž nejstarší důkazy zalednění spadají do středního pleistocénu (datování morén na západních svazích masivu Hualcán) (Giraldez, 2011). Velmi zřetelné jsou důkazy posledního postupu ledovců - morény z tzv. malé doby ledové, jejíž hlavní fáze zde vrcholila (dle datování ledovcových jader z masivu Huascarán a lichenometrického datování vybraných morén) mezi lety 1590

a 1720, vedlejší fáze pak mezi lety 1780 a 1880 (Thompson et al., 2000; Solomina et al., 2007). Za morénymi z tohoto posledního výrazného postupu zalednění jsou, po ústupu zalednění, často zadržována jezera. Přestože dochází k intenzivnímu ústupu zalednění, Cordillera Blanca představuje v současnosti nejvíce zaledněné tropické pohoří, co do plochy i objemu ledovců (Ames & Francou, 1995; Zapata, 2002). Georges (2004) uvádí, že celková rozloha zalednění klesla z 800 až 850 km² v roce 1930 na 600 km² na konci 20. století. S ústupem zalednění se také zvyšoval počet všech typů ledovcových jezer. Zatímco v 50. letech byl celkový počet „velikostně významných“ jezer v pohoří 230 (z toho 119 hrazených morénymi)(Concha, 1951), v 70. letech to již bylo celkem 267 jezer, z toho 148 hrazených morénymi (Morales et al., 1979). Portocarrero (1995) pak uvádí celkový počet jezer v pohoří Cordillera Blanca 899, v současnosti však již jejich počet překročil jeden tisíc (Ing. A.Cocachin, ANA, osobní komunikace).

Obr. 2: Geomorfologické důkazy předchozích zalednění v pohoří Cordillera Blanca.



A – údolí Llaca – typická ukázka ledovcem modelovaného údolí tvaru „U“ (trogu); B – zřetelné ledovcové ohlazy na horninovém výchozu v údolí Pumahuaganga; C – masivní morénové valy dokládající dřívější rozsah zalednění v jižní části pohoří Cordillera Blanca

4.1 Historie výzkumu jezer v pohoří Cordillera Blanca

Díky oteplení a s ním spojenému intenzivnímu ústupu zalednění od konce tzv. malé doby ledové (viz výše; Mark, 2002; Solomina et al., 2007) vznikla a vyvíjela se v oblasti celá řada nestabilních morénymi hrazených jezer, která představovala a díky současnému dynamickému vývoji nadále představují závažnou hrozbu pro obyvatele údolních oblastí (Ames, 1985). Existují historické záznamy o katastrofách spjatých s uvolněním vody z těchto jezer již od začátku 18. století (Zapata, 2002).

Samotný výzkum potenciální nebezpečnosti jezer v této oblasti byl iniciován roku 1941 protržením hrází jezer Palcacocha a Jircacocha a následnou katastrofální povodní, respektive nasyceným tokem, který si ve městě Huaráz vyžádala šest tisíc obětí (Lliboutry et al., 1977a). Na základě těchto výzkumů byla vytipována potenciálně nebezpečná jezera a u čtyřech desítek z nich (Reynolds, 2003; Carey, 2005) poté v průběhu 20. století došlo i k rozličným stabilizačním stavebně-technickým zásahům (viz Obr. 3). Výzkumné a stabilizační práce byly provedeny pod vedením společnosti Corporación Peruana del Santa, později přejmenované na Electroperú (Lliboutry et al., 1977a), Hydrandina, a Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA)(Reynolds, 2003), V současné době nese institut název Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Nejvýraznějšími publikujícími osobnostmi těchto institucí byli v 50. letech J.F. Concha, který publikoval dodnes citovanou práci „Origen de las Lagunas“ (Concha, 1951), či práce shrnující tehdejší stav stavebně technických úprav vybraných jezer (Concha, 1952), později v 60. letech B.A. Morales, který se zabýval jezery Rajucolta a Cashan (Morales, 1966), či jeho práce o ablaci v pohoří Cordillera Blanca (Morales, 1968). Od 70. let v oblasti působil A.M. Caceres, který podrobně popsal stabilizační práce na hrázi jezera Palcacocha (Caceres, 1974), či jezero Llaca (Caceres, 1977), dále B.J. Veliz, který zhodnotil potenciální nebezpečnost jezer v okolí města Huaráz (Veliz, 1974), a také M.L. Zapata, z jehož rozsáhlého seznamu publikací lze uvést například podrobnou výzkumnou zpráva o jezeru Llaca (Zapata, 1970) a později o jezeru Laguna 513 (Zapata, 1992). V 80. letech zde působil M.C. Zamora, který za pomoci helikoptéry provedl systematickou inspekci jezer v pohoří Cordillera Blanca (Zamora, 1982) a A.C. Huaman, jež se mimo jiné věnoval nově vznikajícímu jezeru Laguna 513 (Huaman, 1985). Další významným představitelem byl C.R. Portocarrero, z jehož prací například „Desastres naturales – geologia, causes, efectos y prevenciones“ (Portocarrero, 1984). Řada pozdějších prací je kolektivní (např. Electroperú, 1992; Electroperú, 1995).

Vedle těchto domácích institucí a osobností byla oblast zkoumána také zahraničními vědci, a to především glaciology. Již počátkem 40. let 20. století v oblasti

působil Dr. Kinzl z Innsbrucké univerzity, jehož jméno dnes nese jeden z ledovců masivu Huascarán. Jednu z prvních prací věnovanou problematice nebezpečnosti ledovcových jezer publikoval J.A. Broggi (Broggi, 1942) a dále například V. Oppenheim, který publikoval práci „Sobre las Lagunas de Huaraz“ (Oppenheim, 1946). Od konce 70. let byla oblast zkoumána týmem francouzských vědců pod vedením glaciologa Louise Lliboutryho (Lliboutry, 1977; Lliboutry et al., 1977a,b). V 80. a 90. letech v oblasti působil další významný zástupce Innsbrucké university – klimatolog Georg Kaser (např. Kaser, 1988; Kaser, 1995). Později zde byl proveden zevrubný výzkum povodně z jezera Safuna Alta (Hubbard et al., 2005), výzkum nebezpečnosti jezer v okolí města Huaráz (Vilímek et al., 2005a,b; Klimeš, 2012) a výzkum povodně z jezera Laguna 513 (Carey et al., 2012). Výzkumem stability jezer a problematikou stanovení zranitelnosti v této oblasti se zabývali také Švýcaři (Hegglin & Huggel, 2008) a Američané (Reynolds, 2003; Carey, 2005).

Přestože hráze některých jezer byly stabilizovány rozličnými stavebně-technickými zásahy (viz Obr. 3), k povodním typu GLOF po náhlém uvolnění akumulované vody stále dochází a jsou známy případy, kdy došlo k povodni i ze stabilizovaného jezera, například přelití zpevněné hráze jezera Palcacocha v roce 2003 (Vilímek et al., 2005a). Posledními událostmi pak je přelití hráze jezera Laguna 513 (údolí Hualcán) z 11. dubna 2010 (Carey et al., 2012), či přelití hráze jezera Artizon Alto a následné protržení morénové hráze jezera Artizon Bajo z 8. února 2012 (Ing. A Cochachin, ANA, osobní komunikace). Hrozba náhlého uvolnění vody akumulované v ledovcových jezerech a následné povodně typu GLOF je tedy v této oblasti v současnosti velmi aktuální a vyžaduje patřičnou pozornost.

4.2 Regionální specifika jezer v pohoří Cordillera Blanca

Příčiny povodní typu GLOF z morényami hrazených jezer se mezi různými světovými oblastmi jejich výskytu výrazně liší. Ve všech oblastech sice dominuje pád odlomených bloků ledovce, ledové či sněhové laviny do jezera, zastoupení a podíl dalších příčin je však odlišný. Například zatímco v oblasti Severoamerické Kordillery byla více než třetina událostí se známou příčinou iniciována intenzivními srážkami / táním sněhu (O'Connor et al., 2001), v oblasti Cordillera Blanca nebyla tato příčina zaznamenána vůbec (Emmer, 2013). Vedle dynamických svahových pohybů došlo k inicializaci GLOF v oblasti Cordillera Blanca také v důsledku silného zemětřesení (Lliboutry et al., 1977a; Zapata, 2002), dále bylo v této oblasti zaznamenáno protržení morénové hráze v důsledku povodňové vlny z jezera situovaného výše proti proudu (Vilímek et al., 2005a). Velmi důležitým specifikem této oblasti pak jsou rozličné stavebně-technické úpravy přírodních morénových hrází (viz Obr. 3) (Reynolds, 2003; Carey et al., 2005).

Obr. 3: Stavebně upravená hráz jezera Llaca (viz 4.3.3); převýšení hráze je 12 m



A – pohled na výtok a umělý zpevňující val směrem k jezeru; B – pohled na výtok a zpevňující val směrem od jezera; C – celkový pohled na morénovou hráz jezera Llaca, poloha výtoku a zpevňujícího valu je zvýrazněna kroužkem

Na základě syntézy předchozích výzkumů (Vilímek et al., 2005a,b; Emmer, 2013) a výše uvedeného bylo, pro zjednodušení, agregováno pět skupin charakteristik, které odrážejí regionální specifika povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca a které je tedy žádoucí zohlednit v optimální regionálně zaměřené metodě hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer v této oblasti. Jedná se o:

A) Možnost dynamického svahového pohybu do jezera – dynamické svahové pohyby reprezentují v pohoří Cordillera Blanca nejčastější (prokázanou) příčinu povodně typu GLOF z jezer hrazených morénami, a to s podílem 80 % (Emmer, 2013). Dle charakteru lze rozlišit mezi pádem odlomených bloků ledovce, ledových a sněhových lavin (svahové pohyby s dominancí vody v pevném skupenství) a skalním řícením a sesuvy (svahové pohyby s významným podílem horninového materiálu). Pro zohlednění první skupiny je klíčovým ukazatelem především vzdálenost ledovce od jezera, sklon svahu mezi ledovcem a jezerem, či sklon koncové části ledovcového splazu (např.: Wang et al., 2011). V případě dynamických svahových pohybů s dominancí horninového materiálu je velmi důležitým parametrem sklon vnitřních svahů bočních morén (Grabs & Hanisch, 1993) a dále například doklady horninového řícení v okolí jezera, či drah nasycených toků směřujících do jezera.

B) Možnost povodňové vlny z jezera situovaného výše proti proudu – i v případě jezera, jehož samotná morénová hráz je považována za stabilní a není zřejmá žádná aktuální příčina pro vznik povodně GLOF (např. bezprostředně hrozící svahový pohyb do jezera), může dojít k povodni GLOF z tohoto jezera, a to v důsledku povodňové vlny z jezera situovaného výše proti proudu (Vilímek et al., 2005a). V pohoří Cordillera Blanca bylo zaznamenáno několik případů, kdy došlo k výše uvedenému, například při protržení morénové hráze jezera Artizon Bajo, v důsledku povodňové vlny z jezera Artizon Alto po sesuvu do tohoto jezera v únoru 2012 (A. Cochachin, ANA, osobní komunikace). Z tohoto důvodu je nezbytné vždy uvažovat potenciální nebezpečnost jezera situovaného níže v údolí v kontextu všech objemově významných jezer situovaných výše proti proudu.

C) Možnost protržení hráze v případě silného zemětřesení – pohoří Cordillera Blanca je v geologické současnosti aktivním seismickým regionem. Silné zemětřesení může jednak způsobit protržení morénové hráze přímo v důsledku otřesů (Clague & Evans, 2000), může také iniciovat dynamické svahové pohyby, či změny strukturální integrity hráze, následný průsak a kolaps v důsledku vnitřní eroze nebo naopak zneprůchodnění odtokových kanálů v případě jezera bez povrchového odtoku (Lliboutry et al., 1977a).

Přestože je tato skupina parametrů velmi obtížně kvantifikovatelná, je žádoucí, aby byla v optimální regionálně zaměřené metodě hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca určitým způsobem zohledněna.

D) Rozlišení mezi přírodní hrází a stavebně upravenou hrází (v širším pojetí tedy stabilita hráze) – v případě přírodní morénové hráze je zásadním faktorem její stability erodovatelnost odtokového koryta (kanálu). Tu lze hodnotit například na základě zrnitosti. O celkové stabilitě morénové hráze také určitým způsobem vypovídá přítomnost čoček pohřbeného ledu a průsak hráze (např.: Costa & Schuster, 1988, Clague & Evans, 2000). V případě stavebně upravené hráze (významná část největších jezer v pohoří Cordillera Blanca) je potřeba zohlednit typ stabilizačních prací (zpevnění odtokového koryta x zpevňující val x tunel), protože každý z nich poskytuje ochranu vůči jiným mechanismům kolapsu hráze. Je-li přírodní či stavebně upravená hráz považována za stabilní, stále zde existuje možnost jejího přelití při dynamickém svahovém pohybu do jezera. Z tohoto důvodu je nezbytné zohlednit převýšení hráze (viz níže).

E) Převýšení hráze (poměr převýšení hráze) - převýšení hráze (vertikální vzdálenost mezi úrovní hladiny vody v jezeře a nejnižším bodem hřebene hráze) je klíčovou charakteristikou, která je přímo odpovědná za případné (ne)přelití hráze při dynamickém svahovém pohybu do jezera a vzniku tzv. nárazové vlny. Převýšení hráze může být jednak přirozené (jezera bez povrchového odtoku) a nebo umělé (často např. konstrukcí sypaného / zděného kamenného valu v nejnižším bodě hřebene hráze – obvykle tedy v místě výtoku (viz Obr. 3)). Samotné převýšení hráze však nemá takovou vypovídací hodnotu při srovnávání různých jezer, z tohoto důvodu je tedy vhodnější použít některý z poměrů převýšení hráze (například poměr převýšení hráze ku celkové výšce hráze, či hloubce jezera).

4.3 Charakteristika zájmových jezer

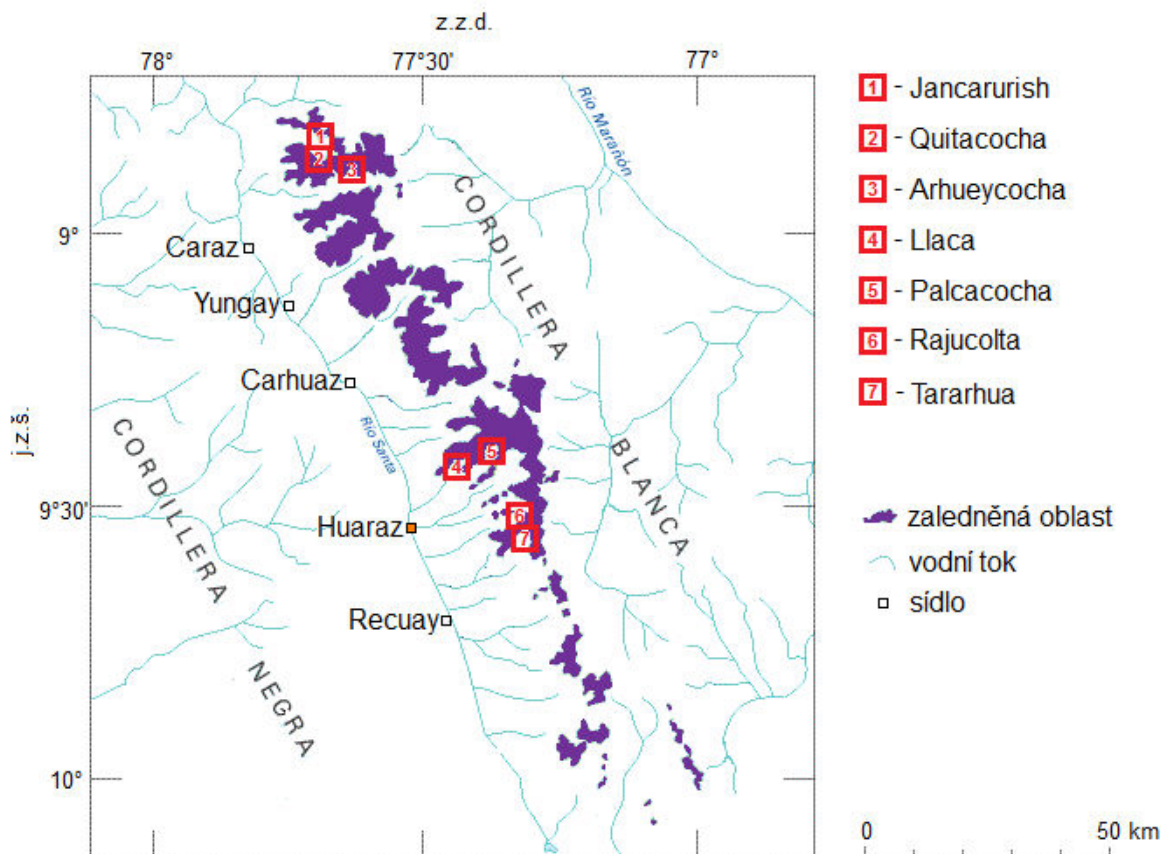
Bylo vybráno sedm morénami hrazených jezer (viz Tab. 11), která splňují všechna tři výběrová kritéria (viz 2.1). Jedná se o jezera Palcacocha, Jancarurish, Rajucolta, Llaca, Quitacocha, Tararhua a Arhueycocha, jenž jsou všechna situována v západní části pohoří (viz Obr. 4) a spadají tak do povodí řeky Rio Santa, ústící do Tichého oceánu. Tato jezera jsou hrazena morénami, které byly zformovány při posledním postupu ledovců během tzv. malé doby ledové (viz výše). Jejich stáří je tak řádově desítky až první stovky let (Solomina et al., 2007). Jednotlivá jezera a jejich charakteristiky (vstupní data pro vlastní hodnocení ohrožení) jsou podrobně popsána v této části práce.

Tab. 11: Základní charakteristiky studovaných jezer

Jezero	Údolí	Nadmořská výška hladiny [m n.m.]	Poloha	Stavebně- technické zásahy	GLOF
Palcacocha	Cojup	4 566	9°24'00" j.z.š. 77°22'59" z.z.d.	OC, AD	13.12.1941 19.3.2003
Jancarurish	Los Cedros / Alpamayo	4 290	8°51'09" j.z.š. 77°40'28" z.z.d.	-	20.10.1950
Rajucolta	Rajucolta	4 273	9°31'39" j.z.š. 77°20'55" z.z.d.	OC, AD	24.6.1883
Llaca	Llaca	4 474	9°26'18" j.z.š. 77°26'46" z.z.d.	OC, AD	-
Quitacocha	Alpamayo	4 724	8°52'41" j.z.š. 77°41'06" z.z.d.	-	-
Tararhua	Rurec	4 488	9°34'11" j.z.š. 77°19'49" z.z.d.	-	-
Arhueycocha	Santa Cruz	4 429	8°53'23" j.z.š. 77°37'52" z.z.d.	OC	-

OC – „open cut“ zahloubené odtokové koryto ošetřené proti erozi (zahloubením je snížena úroveň hladiny vody a tím i zadržovaný objem); AD – „artificial dam“ umělý val zvyšující převýšení hráze v jejím nejnižším bodě, obvykle tedy v místě výtoku

Obr. 4: Poloha studovaných jezer v pohoří Cordillera Blanca (podkladová mapa: USGS)



4.3.1 Jezero Palcacocha

Jezero Palcacocha (viz Obr. 5) se nachází v údolí Cojup situovaném v západní části pohoří Cordillera Blanca pod šestitisícovými vrcholy Pucaranra (6 156 m n.m.) a Palcaraju (6 274 m n.m.). Podstatné mezníky vývoje jezera a jeho potenciální nebezpečnosti jsou shrnuty v Tabulce 12. Hráz původního jezera se protrhla v roce 1941 a vzniklá povodeň typu GLOF zničila třetinu města Huaráz a vyžádala si přes 6 000 obětí na životech (Lliboutry et al., 1977a). Současné jezero Palcacocha je hrazené morénou bazální, na které byly v 70. letech vystavěny dva zpevňující valy poté, co došlo k poškození původně pouze zahloubeného výtoku zemětřesením v roce 1970. Tyto valy poskytují převýšení hráze 7 m (viz Obr. 5). V roce 2003 však došlo ke vzniku nárazové vlny (pravděpodobně v důsledku sesuvu části levé boční morény do jezera), přelítí hráze a náhlému uvolnění menšího objemu vody. V údolí pak tato povodňová vlna poškodila zařízení na odběr a úpravu pitné vody. Stávající převýšení hráze bylo tedy nedostatečné. Na podzim roku 2011 tak bylo přistoupeno k instalaci šestice sifonů, které mají za úkol odčerpávat vodu z jezera, snižovat úroveň hladiny vody a zvyšovat tak převýšení hráze. Podle původních plánů pak bude zahlouben stávající výtok vody z jezera, čímž dojde k fixaci vyššího převýšení hráze a zároveň snížení objemu zadržované vody (Ing. A.Cochachin, ANA, osobní komunikace).

Tab. 12: Vývoj jezera Palcacocha od tzv. „malé doby ledové“ (LIA)

Období / datum	Vývoj jezera / událost	Reference
LIA	Postup ledovce a formování čelní a bočních morén	Mark, 2002 Solomina et al., 2007
Od konce LIA	Ústup ledovce, vznik a vývoj morénou hrazeného jezera	Oppenheim, 1946
13. prosince 1941	Protržení morény hradící jezero (pravděpodobně v důsledku pádu odlomené části ledovce do jezera) a uvolnění většiny akumulované vody	Oppenheim, 1946 Evans & Clauge, 1994 Zapata, 2002
Od 40. let	Pokračující ústup ledovce, plošné a objemové zvětšování jezera hrazeného již bazální morénou; zahloubení výtoku o 3,8 m	Santillán & Gómez, 2009
70. léta 20. století	Stavebně-technické úpravy stávající morénové hráze (snížení úrovně hladiny, zpevnění odtokového koryta, vybudování dvou umělých valů zvyšujících převýšení hráze na 7 m)	Electroperú, 1973
19. března 2003	Přelítí a částečné poškození zpevněné hráze (pravděpodobně v důsledku sesuvu části levé boční morény do jezera a následné nárazové vlny)	Vilímek et al., 2005a
Od konce roku 2011	Snižování úrovně hladiny jezera pomocí šesti sifonů (viz Obr. 5)	Ing. A. Cocachin, ANA, osobní komunikace

Obr. 5: Jezero Palcacocha a jeho základní charakteristiky

JEZERO:

max. délka: 1 570 m
max. šířka: 450 m
max. hloubka: 73 m
objem zadržované vody: 17,325 mil. m³
plocha: 528 400 m²

Zdroj: INRENA batymetrie z roku 2004

BLÍZKÉ OKOLÍ JEZERA:

náchylnost k dynamickým horninovým svahovým pohybům: ANO

náchylnost k ledovým / sněhovým lavinám: ANO

přítomnost potenciálně nebezpečných jezer výše proti proudu: ANO

Zdroj: terénní průzkum; snímky Google Earth, Digital Globe 2013

LEDOVEC:

vzdálenost čela ledovce od jezera: 0 m

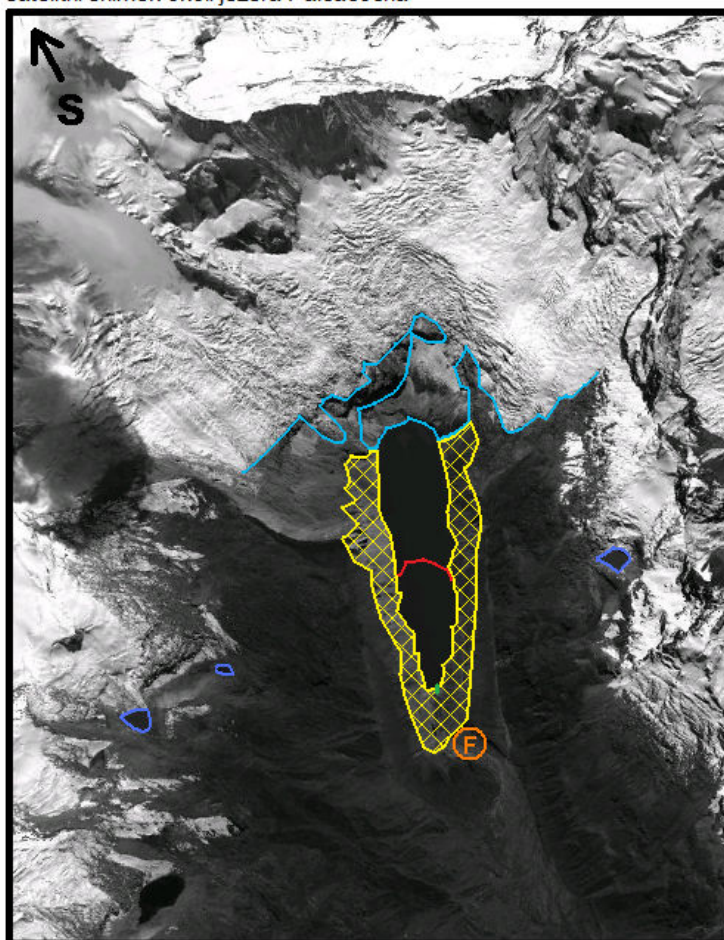
sklon svahu mezi ledovcem a jezerem: -

sklon koncové části ledovcového splazu: 27°







rozloha mateřského ledovce: 4,4 km²

Zdroj: snímky Google Earth, Digital Globe 2013

satelitní snímek okolí jezera Palcacocha



snímek: Google Earth, Digital Globe 2013; datum snímku: 5.5.2012; výška pohledu: 14 km

-  nestabilní morénové svahy přivrácené k jezeru
-  rozsah zalednění v 5/2012
-  konec ledovcového splazu (a zároveň jezera) v roce 1970
-  jezera situovaná nad jezerem Palcacocha
-  místo protržení morénové hráze v roce 1941
-  zpevněný výtok z jezera s ochranným valem

HRÁZ:

stavebně technické úpravy: ANO

sklon vnějšího svahu hráze: 5°

převýšení hráze: 7 m

průsak hráze: ANO

přítomnost pohřbeného ledu: ANO

poměr šířky ku výšce hráze: velký

Zdroj: terénní průzkum; výzkumné zprávy INRENA / ANA; přítomnost pohřbeného ledu podle metodiky McKillop & Clague (2007a); poměr šířky ku výšce hráze podle metodiky Huggel et al. (2004)

hráz se dvěma zpevňujícími valy a sifony instalovanými v roce 2011



Foto: A. Emmer

4.3.2 Jezero Arhueycocha

Jezero Arhueycocha (viz Obr. 6) se nachází v bočním údolí ústícím ze severu do údolí Santa Cruz. Jezero je ze tří stran obklopeno šestitisícovými vrcholy (Quitaraju, 6 036 m n.m.; Alpamayo, 5 947 m n.m.; Pucajirca, 6 039 m n.m.). Díky této neexponované poloze začalo jezero vznikat až ve druhé polovině 20. století vývojem a následným spojováním malých supraglaciálních jezírek na čele ustupujícího ledovcového splazu (Reynolds, 2003). Arhueycocha je tak jedním z nejmladších a s délkou přes 1 km a šířkou 400 m zároveň jedním z největších morénou hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca. Mezi lety 1999 a 2000 byl za účelem redukce zadržovaného objemu vody zahlouben výtok z jezera o 8 m. Původním plánem bylo zahloubit výtok o dalších 7 m, nicméně z důvodů finančních limitů to nebylo realizováno. Zahloubený výtok byl v délce 122 m vybetonováním ošetřen proti erozi. Na rozdíl od jezer Palcacocha (viz 4.3.1) či Llaca (viz 4.3.3) však nebyl nad zahloubeným výtokem zároveň vybudován zpevňující val, který by zvyšoval převýšení hráze (Reynolds, 2003). Upravená morénová hráz tak je určitým způsobem chráněna proti vlastnímu protržení v důsledku eroze odtokového koryta, nicméně neposkytuje žádnou ochranu proti nárazovým vlnám vzniklým dynamickými svahovými pohyby do jezera.

4.3.3 Jezero Llaca

Jezero Llaca (viz Obr. 7) se nachází ve stejnojmenném údolí pod šestitisícovým vrcholem Ranrapalca (6 162 m n.m.) a je ze sedmi studovaných jezer plošně i objemově nejmenší. Na druhou stranu má toto jezero zřejmě největší růstový potenciál. Po katastrofě způsobené protržením morénové hráze jezera Palcacocha v roce 1941 byla vytipována potenciálně nebezpečná jezera, u kterých byly následně provedeny stabilizační práce (viz 4.1). Bylo rozhodnuto i o úpravách hráze jezera Llaca, které dynamicky zvětšovalo svůj objem. Dalším faktorem byla pozice jezera nad městem Huaráz. V 50. letech tak bylo přistoupeno k zahloubení výtoků a tím k výraznému snížení objemu zadržované vody. Zemětřesení v roce 1970 pak, stejně jako v případě jezera Palcacocha (viz 4.3.1), poškodilo stavebně upravenou hráz do té míry, že bylo nezbytné provést její kompletní rekonstrukci. U této příležitosti byl výtok z jezera zahlouben o dalších 10 m, čímž byl opět výrazně snížen objem zadržované vody, a dále byl zbudován ochranný val poskytující 12 m převýšení (viz Obr. 3)(Reynolds, 2003). V současné době jezero tvoří dvě hlavní pánve, které odděluje vystupující bazální moréna s čočkami pohřbeného ledu a řadou menších jezírek. Obě pánve pak jsou propojené systémem kanálů. S dalším ústupem ledovce a odtáváním čoček pohřbeného ledu v bazální moréně zřejmě dojde ke spojení obou pánví a tím k dalšímu plošnému i objemovému zvětšování jezera.

Obr. 6: Jezero Arhueycocha a jeho základní charakteristiky

JEZERO:

max. délka: 1 170 m
max. šířka: 420 m
max. hloubka: 110 m
objem zadržované vody: 8,500 mil. m³
plocha: 411 000 m²

Zdroj: INRENA batymetrie z roku 2000; Reynolds (2003); snímky Google Earth, Digital Globe 2013

BLÍZKÉ OKOLÍ JEZERA:

náchylnost k dynamickým horninovým svahovým pohybům: ANO

náchylnost k ledovým / sněhovým lavinám: ANO

přítomnost potenciálně nebezpečných jezer výše proti proudu: NE

Zdroj: Reynolds (2003); snímky Google Earth, Digital Globe 2013

LEDOVEC:

vzdálenost čela ledovce od jezera: 0 m

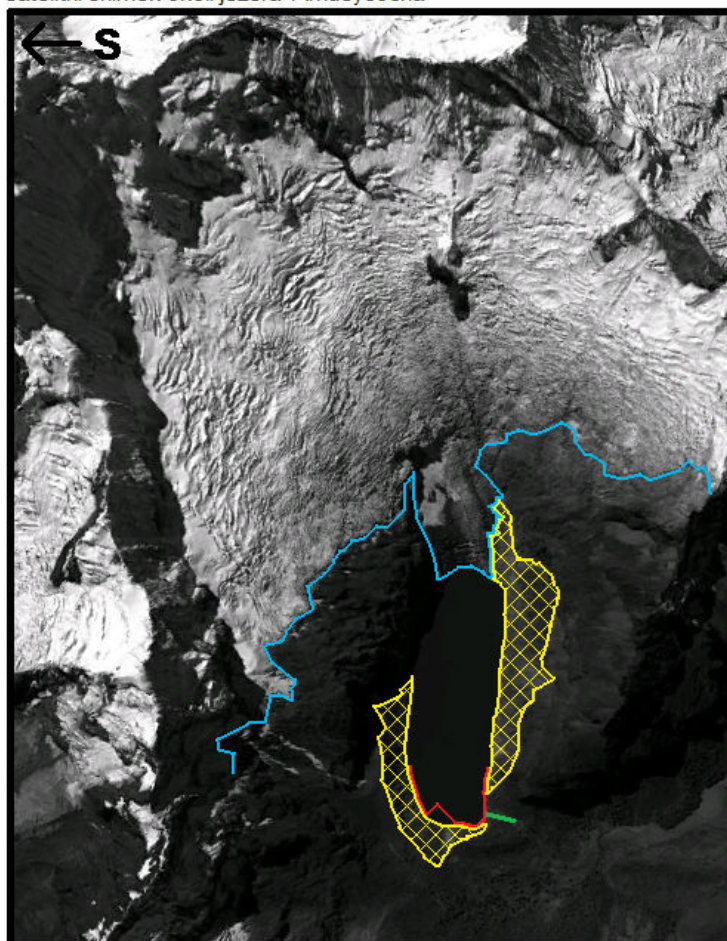
sklon svahu mezi ledovcem a jezerem: -

sklon koncové části ledovcového splazu: 37°

rozloha mateřského ledovce: 4,0 km²

Zdroj: Reynolds (2003); snímky Google Earth, Digital Globe 2013

satelitní snímek okolí jezera Arhueycocha



snímek: Google Earth, Digital Globe 2013; datum snímku: 3.7.2010; výška pohledu: 11 km



nestabilní morénové svahy přivrácené k jezeru



rozsah zalednění v 7/2010



konec ledovcového splazu (a zároveň jezera) v roce 1970



zpevněný výtok z jezera vybudovaný mezi lety 1999 a 2000

HRÁZ:

stavebně technické úpravy: ANO

sklon vnějšího svahu hráze: 18°

převýšení hráze: 0 m

průsak hráze: NE

přítomnost pohřbeného ledu: NE

poměr šířky ku výšce hráze: velký

Zdroj: Výzkumné zprávy INRENA / ANA; přítomnost pohřbeného ledu podle metodiky McKillop & Clague (2007a); poměr šířky ku výšce hráze podle metodiky Huggel et al. (2004)

blíže pohled na hráz jezera se zpevněným výtokem (8/2012)



snímek: Google Earth, Digital Globe 2013; datum snímku: 3.8.2012; výška pohledu: 5 km

Obr. 7: Jezero Llaca a jeho základní charakteristiky

JEZERO:

max. délka: 400 m *)
max. šířka: 200 m
max. hloubka: 17 m
objem zadržované vody: 0,274 mil. m³
plocha: 44 000 m²

Zdroj: terénní průzkum; INRENA batymetrie z roku 2004; snímky Google Earth, Digital Globe 2013

BLÍZKÉ OKOLÍ JEZERA:

náchylnost k dynamickým horninovým svahovým pohybům: ANO

náchylnost k ledovým / sněhovým lavinám: ANO

přítomnost potenciálně nebezpečných jezer výše proti proudu: NE

Zdroj: terénní průzkum; snímky Google Earth, Digital Globe 2013

LEDOVEC:

vzdálenost čela ledovce od jezera: 0 m

sklon svahu mezi ledovcem a jezerem: -

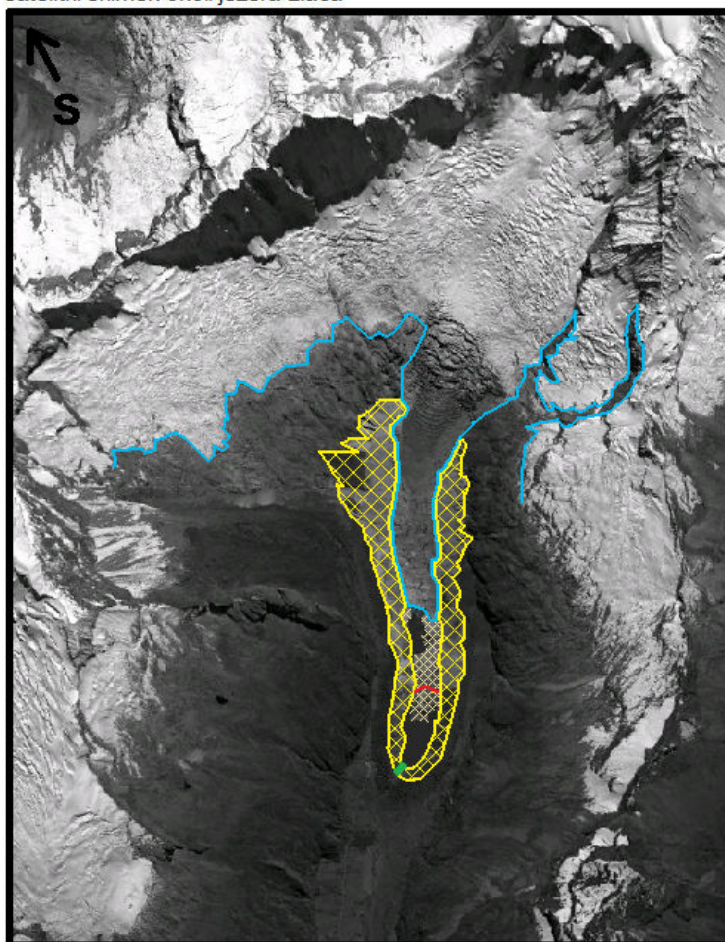
sklon koncové části ledovcového splazu: 7°

rozloha mateřského ledovce: 3,2 km²






Zdroj: terénní průzkum; snímky Google Earth, Digital Globe 2013

*) uvedené údaje se vztahují pouze k dolní pánvi jezera; celková délka jezera, počítáme-li obě pánve (částečně oddělené vystupující bazální morénou), dosahuje 950 m (2012); rovněž plocha a celkový objem zadržované vody jsou vyšší

satelitní snímek okolí jezera Llaca



snímek: Google Earth, Digital Globe 2013; datum snímku: 31.5.2011; výška pohledu: 13 km

-  nestabilní morénové svahy přivrácené k jezeru / ledovci
-  vystupující bazální moréna s řadou kanálů a menších jezírek
-  rozsah zalednění v 5/2011
-  konec ledovcového splazu (a zároveň jezera) v roce 1970
-  zpevněný výtok z jezera s ochranným valem

HRÁZ:

stavebně technické úpravy: ANO (viz Obr. 3)

sklon vnějšího svahu hráze: 21°

převýšení hráze: 12 m

průsak hráze: ANO

přítomnost pohřbeného ledu: NE

poměr šířky ku výšce hráze: velký

Zdroj: terénní průzkum; výzkumné zprávy INRENA / ANA; přítomnost pohřbeného ledu podle metodiky McKillop & Clague (2007a); poměr šířky ku výšce hráze podle metodiky Huggel et al. (2004)

pohled z hráze na jezero s vystupující bazální morénou



Foto: A. Emmer

4.3.4 Jezero Jancarurish

Jezero Jancarurish (viz Obr. 8) je situováno v závěru údolí de Los Cedros / Alpamayo v severní části pohoří Cordillera Blanca. Moréna hradící jezero byla zformována během malé doby ledové postupujícím ledovcovým splazem ledovce Kogan ze severní strany vrcholu Quitaraju (6 036 m n.m.). Po odeznění malé doby ledové zároveň s ústupem ledovce pak začalo vznikat a vyvíjet se morénou hrazené jezero (viz Tab. 13). 20. října 1950, během prací na zahlubování odtokového koryta, došlo k protržení oslabené morénové hráze a náhlému uvolnění části zadržované vody a poklesu hladiny jezera o 21 m. Costa & Schuster (1988) uvádějí, že se mohlo jednat o 6 až 10 milionů m³ vody, přičemž maximální průtok dosáhl 7 - 8 000 m³/s. Příčinou byl pád odlomeného bloku z čela ledovce do jezera (Lliboutry et al., 1977a), následovaný nárazovou vlnou a erozí hráze podpořenou mechanismem tzv. pozitivní zpětné vazby (urychlením eroze při vyšším průtoku vody způsobeným zahlubováním odtokového koryta v důsledku eroze)(Yamada, 1998). Vedle dvou set obětí na životech (neoficiální zdroje hovoří dokonce o pěti stech (Lliboutry et al., 1977a)), došlo při této události k významnému poškození rozestavěného hydroelektrárenského díla Caraz - Cañón del Pato, které již nikdy nebylo podle původních plánů obnoveno. Rovněž byla poničena důležitá komunikace spojující sídlo Huallanca s přímořským centrem Chimbote (Cochachin & Torres, 2011). Jezero samotné však nezaniklo, zůstalo menší jezero hrazené již protrženou morénou. Koncem roku 1950 bylo provedeno batymetrické měření, přičemž maximální zaznamenaná hloubka byla 40 m. Při batymetrickém měření v roce 2011 pak byla zaznamenaná maximální hloubka bezmála 90 m. To svědčí o velmi výrazném růstu jezera a zvětšování objemu zadržované vody, a to jednak v důsledku ústupu ledovce a pravděpodobně také díky odtávání ledu vázaného u dna jezera (v bazální moréně).

Tab. 13: Vývoj jezera Jancarurish od tzv. „malé doby ledové“ (LIA)

Období / datum	Vývoj jezera / událost	Reference
LIA	Postup ledovce a formování čelní a bočních morén	Mark, 2002
Od konce LIA	Ústup ledovce, vznik a vývoj morénou hrazeného jezera	
Od roku 1949	Stavebně technické úpravy hráze - zahlubování výtoku; postupně se podařilo zahloubit výtok o 15 m	Lliboutry et al., 1977a
20.října 1950	Protržení morény hradící jezero v důsledku pádu odlomené části telícího se ledovce do jezera, navíc v kombinaci s oslabením hráze probíhajícím zahlubováním výtoku	Lliboutry et al., 1977a
Od roku 1950	Pokračující ústup čela ledovce na skalní stupeň nad jezero; plošné zvětšování jezera a nárůst objemu zadržované vody	Cochachin & Torres, 2011

Obr. 8: Jezero Jancarurish a jeho základní charakteristiky

JEZERO:

max. délka: 1 010 m
max. šířka: 470 m
max. hloubka: 88 m
objem zadržované vody: 12,322 mil. m³
plocha: 318 600 m²

Zdroj: ANA batymetrie z roku 2011; snímky Google Earth, Digital Globe 2013

BLÍZKÉ OKOLÍ JEZERA:

náchylnost k dynamickým horninovým svahovým pohybům: ANO

náchylnost k ledovým / sněhovým lavinám: ANO

přítomnost potenciálně nebezpečných jezer výše proti proudu: ANO (Quitacocha; viz 4.3.5)

Zdroj: výzkumné zprávy INRENA / ANA; snímky Google Earth, Digital Globe 2013

LEDOVEC:

vzdálenost čela ledovce od jezera: 540 m

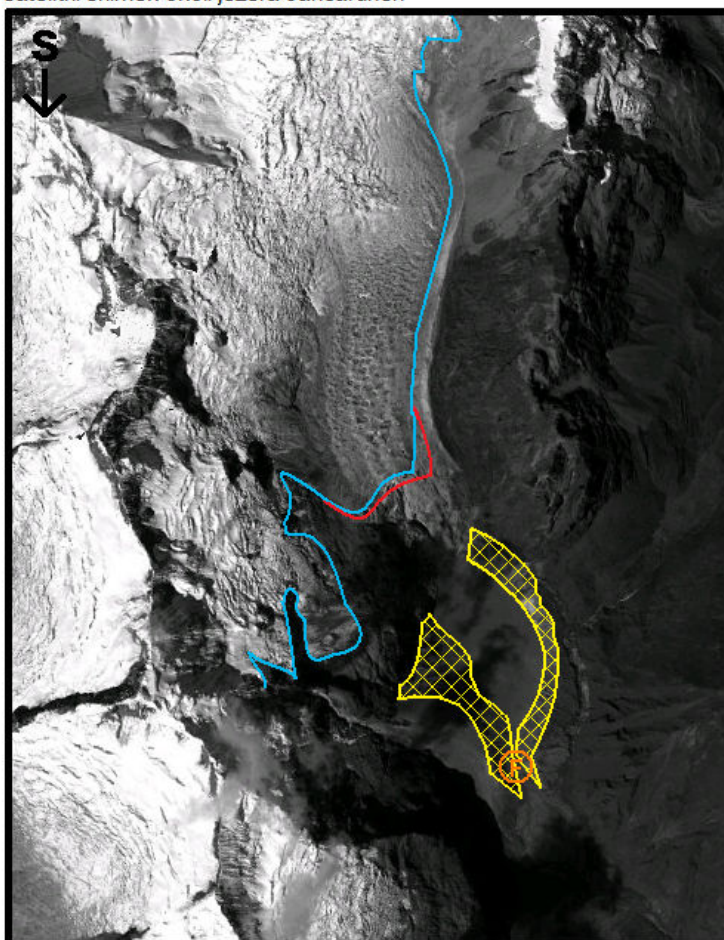
sklon svahu mezi ledovcem a jezerem: 50°

sklon koncové části ledovcového splazu: 5°

rozloha mateřského ledovce: 4,7 km²

Zdroj: výzkumné zprávy INRENA / ANA; snímky Google Earth, Digital Globe 2013

satelitní snímek okolí jezera Jancarurish



snímek: Google Earth, Digital Globe 2013; datum snímku: 3.7.2010; výška pohledu: 12 km

nestabilní morénové svahy přivrácené k jezeru

rozsah zalednění v 7/2010

konec ledovcového splazu v roce 1970

místo protřetí morénové hráze v roce 1950

HRÁZ:

stavebně technické úpravy: NE

sklon vnějšího svahu hráze: 8°

převýšení hráze: 0 m

průsak hráze: NE

přítomnost pohřbeného ledu: NE

poměr šířky ku výšce hráze: velký

Zdroj: Výzkumné zprávy INRENA / ANA; přítomnost pohřbeného ledu podle metodiky McKillop & Clague (2007a); poměr šířky ku výšce hráze podle metodiky Huggel et al. (2004)

protřetí hráz jezera Jancarurish (8/2011)

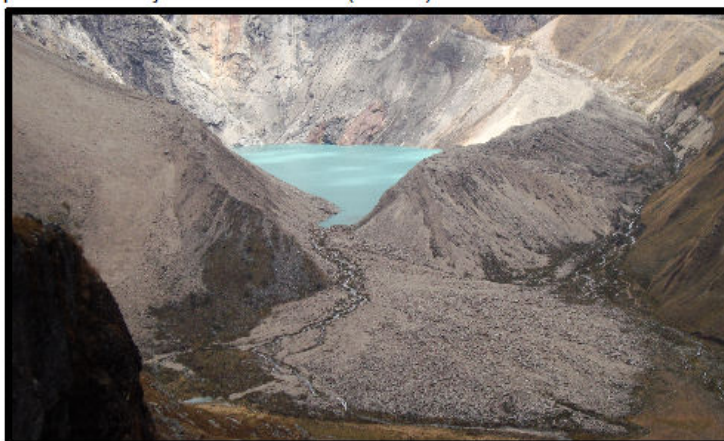


Foto: A.Cochachin (ANA)

4.3.5 Jezero Quitacocha

Jezero Quitacocha (někdy též nazývané jako Laguna 42 či Laguna Nueva; viz Obr. 9) se nachází v údolí na SZ straně masivu Quitaraju (6 036 m n.m.), nedaleko jezera Jancarurish (viz 4.3.4), se kterým tvoří propojený systém (viz níže). Ledovcový splaz, který zformoval morénu hradící jezero Quitacocha již ustoupil do té míry, že rozměry jezera jsou několik desítek let prakticky neměnné. Jezero je poměrně specifické tím, že je kompletně odvodňované průsakem skrz morénovou hráz. To přináší určité výhody (např. nenulové převýšení hráze, které poskytuje ochranu vůči nárazovým vlnám), ale i nevýhody - možnost ucpání odtokových kanálů a nekontrolovatelného plnění jezera, či naopak vnitřní eroze a následný kolaps hráze, například v důsledku zemětřesení (Lliboutry et al., 1977a). Údolí, ve kterém je situováno jezero Quitacocha, ústí zhruba v polovině levé laterální morény jezera Jancarurish (viz 4.3.4), kde se tok takřka kolmo stáčí a pokračuje podél morény a následně výplavového kužele až po soutok s tokem odvodňujícím jezero Jancarurish (viz Obr. 8). V případě náhlého uvolnění většího objemu vody z jezera Quitacocha by pravděpodobně v místě prudkého zalomení toku došlo k sesuvu části boční morény a k zasažení jezera Jancarurish.

4.3.6 jezero Tararhua

Jezero Tararhua (známé též pod názvem Verdecocha) se nachází v údolí Rurec v jižní části pohoří Cordillera Blanca. Jezero je v mnoha ohledech atypické, v první řadě pak svým tvarem (viz Obr. 10). Ten je důsledkem formování jezera dvěma ledovcovými splazy zároveň - od SV ve směru hlavního údolí ledovcovým splazem z masivu Rurec (5 700 m n.m.) a od JV kolmo na hlavní údolí ledovcovým splazem z masivu Uruashraju (5 722 m n.m.). Výrazným morfologickým prvkem v jezeře pak je delta (cca 15 000 m²) v místě pravého bočního přítoku do jezera. Ta svědčí o velkém materiálovém přínosu do jezera a potažmo i o jeho zanášení. Rovněž maximální hloubka jezera (respektive objem zadržované vody) jsou vzhledem k ploše jezera, ve srovnání s ostatními studovanými jezery, malé. Geologickým specifikem údolí Rurec pak je rozhraní mezi granitickými horninami na východě a vulkanity / sedimentárními horninami na západě (Klimeš, 2012), které prochází jezerem. Tato odlišná geologie může zároveň být důvodem, proč jezera jižní části pohoří Cordillera Blanca nemají vyvinuté morénové valy s příkrými svahy tak, jako jezera v centrální a severní (převážně granitické) části pohoří. Masivní, avšak poměrně plochý morénový val s řadou překrývajících se hřebenů pak nasvědčuje přítomnosti pohřbeného ledu (metodika McKillop & Clague, 2007a; viz 3.2). Ve výšce kolem 4 800 m n.m. se na pravém břehu nacházejí tři jezera, (jedno hrazené morénou a dvě skalním stupněm), která však v nejdelším rozměru nepřesahují 150 m.

Obr. 9: Jezero Quitacocha a jeho základní charakteristiky

JEZERO:

max. délka: 750 m
max. šířka: 270 m
max. hloubka: 57 m
objem zadržované vody: 3,232 mil. m³
plocha: 130 407 m²

Zdroj: ANA batymetrie z roku 2011; snímky Google Earth, Digital Globe 2013

BLÍZKÉ OKOLÍ JEZERA:

náchylnost k dynamickým horninovým svahovým pohybům: ANO
náchylnost k ledovým / sněhovým lavinám: ANO
přítomnost potenciálně nebezpečných jezer výše proti proudu: NE

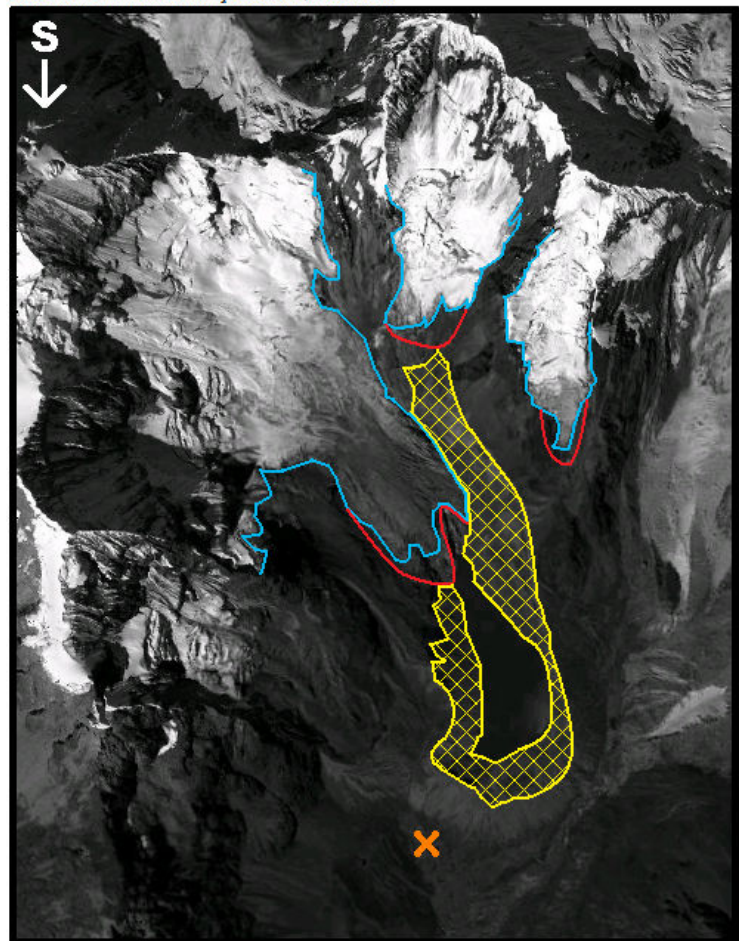
Zdroj: snímky Google Earth, Digital Globe 2013

LEDOVEC:





vzdálenost čela ledovce od jezera: 60 m
sklon svahu mezi ledovcem a jezerem: 48°
sklon koncové části ledovcového splazu: 17°
rozloha mateřského ledovce: 0,9 km²

Zdroj: snímky Google Earth, Digital Globe 2013

satelitní snímek okolí jezera Quitacocha



snímek: Google Earth, Digital Globe 2013; datum snímku: 3.7.2010; výška pohledu: 10 km

-  nestabilní morénové svahy přivrácené k jezeru / ledovci
-  rozsah zalednění v 7/2010
-  konce ledovcových splazů v roce 1970
-  výtok vody z jezera

HRÁZ:

stavebně technické úpravy: ANO
sklon vnějšího svahu hráze: 25°
převýšení hráze: 25 m
průsak hráze: ANO
přítomnost pohřbeného ledu: NE
poměr šířky ku výšce hráze: velký

Zdroj: Výzkumné zprávy INRENA / ANA; přítomnost pohřbeného ledu podle metodiky McKillop & Clague (2007a); poměr šířky ku výšce hráze podle metodiky Huggel et al. (2004)

Morénová hráz s ústím podzemního odtokového kanálu (označeno šipkou)



Foto: A. Cochachin (ANA)

Obr. 10: Jezero Tararhua a jeho základní charakteristiky

JEZERO:

max. délka: 1 400 m
max. šířka: 470 m
max. hloubka: 31 m
objem zadržované vody: 4,238 mil. m³
plocha: 358 000 m²

Zdroj: INRENA batymetrie z roku 2008

BLÍZKÉ OKOLÍ JEZERA:

náchylnost k dynamickým horninovým svahovým pohybům: NE

náchylnost k ledovým / sněhovým lavinám: ANO

přítomnost potenciálně nebezpečných jezer výše proti proudu: ANO

Zdroj: výzkumné zprávy INRENA / ANA; snímky Google Earth, Digital Globe 2013

LEDOVEC:

vzdálenost čela ledovce od jezera^{*)}: 250 m

sklon svahu mezi ledovcem a jezerem: 34°

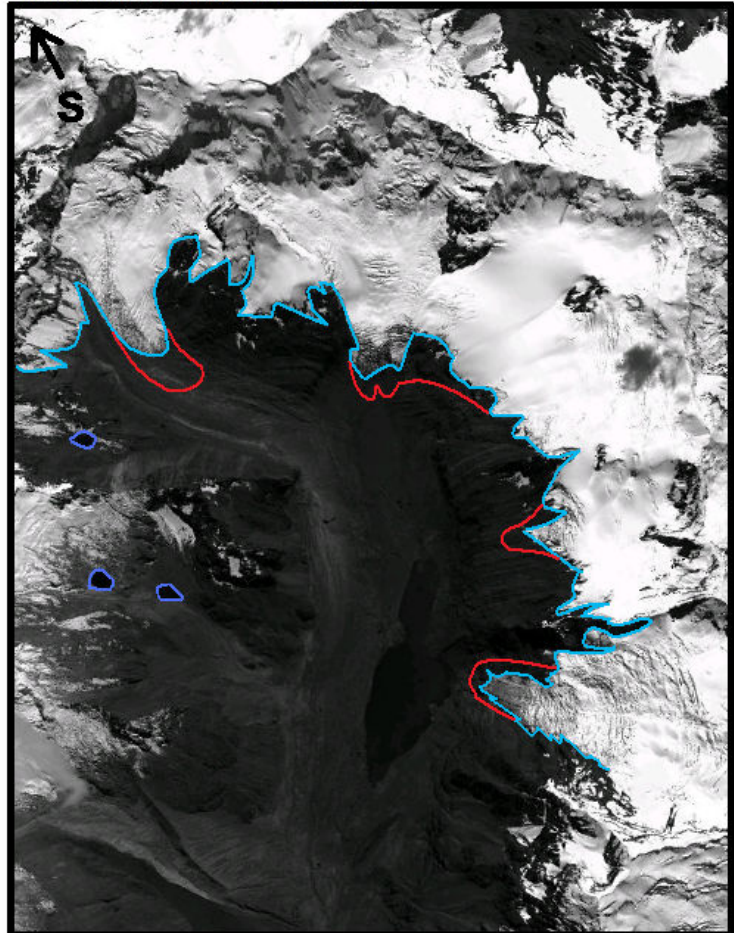
sklon koncové části ledovcového splazu: 33°

rozloha mateřského ledovce: 0,8 km²




Zdroj: výzkumné zprávy INRENA / ANA; snímky Google Earth, Digital Globe 2013

^{*)} uvedené údaje se vztahují pouze k nejbližšímu ledovci, tzn. ledovci ze SZ strany masivu Uruashraju

satelitní snímek okolí jezera Tararhua



snímek: Google Earth, Digital Globe 2013; datum snímku: 5.5.2012; výška pohledu: 13 km

-  rozsah zalednění v 5/2012
-  konce ledovcových splazů v roce 1970
-  jezera situovaná nad jezerem Tararhua

HRÁZ:

stavebně technické úpravy: NE

sklon vnějšího svahu hráze: 7°

převýšení hráze: 0 m

průsak hráze: NE

přítomnost pohřbeného ledu: ANO

poměr šířky ku výšce hráze: velký

Zdroj: Výzkumné zprávy INRENA / ANA; přítomnost pohřbeného ledu podle metodiky McKillop & Clague (2007a); poměr šířky ku výšce hráze podle metodiky Huggel et al. (2004)

Detail hráze jezera Tararhua s patrnými překrývajícími se hřebeny indikujícími přítomnost čoček pohřbeného ledu



snímek: Google Earth, Digital Globe, 2013; datum snímku: 27.7.2011; výška pohledu: 5,3 km

4.3.7 Jezero Rajucolta

Jezero Rajucolta (viz Obr. 11) se nachází ve stejnojmenném údolí v jižní části pohoří Cordillera Blanca na JZ straně druhého nejvyššího masivu Huantsan (6 395 m n.m.). Ze studovaných jezer je Rajucolta největší objemem zadržované vody, který přesahuje 17,5 milionu m³. Je tedy poměrně překvapivé, že ke stavebně-technickým úpravám hráze (zhloubení koryta a stavbě umělého valu s převýšením 14 m) bylo přistoupeno až v roce 2004 (viz Tab. 14), přestože uvolnění byt' jen části zadržovaného objemu vody by znamenalo zasažení celého horního toku řeky Santa. Stabilizační práce si objednala a zároveň dvěma miliony dolary financovala soukromá společnost Duke Energy, která zde v současné době provozuje hydroelektrárnu. Obdobně jako v případě jezera Tararhua (viz 4.3.6), většina vnitřních svahů morén obklopujících jezero nemá tak velký sklon, jako morény jezer v granitové části pohoří Cordillera Blanca, které jsou často na stranách přivrácených k jezeru téměř kolmé. Morénové svahy obklopujících jezero Rajucolta nevykazují žádné zjevné známky recentních dynamických svahových pohybů (např. odsednuté části morény). Jejich stabilita je navíc podpořena poměrně husou vegetací (jezero je ze všech studovaných jezer situováno v nejnižší nadmořské výšce (viz Tab. 11)). Nad jezerem po obou stranách ve výšce kolem 4 800 m n.m. jsou situována dvě poměrně velká jezera, která dosahují délky přes 300 m. Jezero na levém břehu je hrazené morénou a jezero na pravém břehu skalním stupněm. Náhlého uvolnění vody akumulované v těchto jezerech by pravděpodobně ovlivnilo i jezero Rajucolta.

Tab. 14: Vývoj jezera Rajucolta od tzv. „malé doby ledové“ (LIA)

Období / datum	Vývoj jezera / událost	Reference
LIA	Postup ledovce a formování čelní a bočních morén	Mark, 2002
Od konce LIA	Ústup ledovce, vznik a vývoj morénou hrazeného jezera	
24.6.1883	Uvolnění významného objemu vody přelitím hráze vedlo v údolí ke ztrátám na životech a značným škodám na majetku - zničena byla škola a řada domů, zaplavena byla rovněž pole v údolí	Zapata, 2002
20. století	Pokračující ústup ledovce; plošné i objemové zvětšování jezera	Snímky DPZ
2004	Stavebně-technické úpravy hráze jezera - zhloubení výtoku, stavba umělého valu s převýšením 14 m, instalace turbín pro výrobu elektrické energie	Santillán, 2004; Klimeš, 2012
Od roku 2004	Provoz hydroelektrárny společností Duke Energy	Ing. A. Cocachin, ANA, osobní komunikace

Obr. 11: Jezero Rajucolta a jeho základní charakteristiky

JEZERO:

max. délka: 1 560 m
max. šířka: 510 m
max. hloubka: 73 m
objem zadržované vody: 17,546 mil. m³
plocha: 513 000 m²

Zdroj: INRENA batymetrie z roku 2004

BLÍZKÉ OKOLÍ JEZERA:

náchylnost k dynamickým horninovým svahovým pohybům: NE

náchylnost k ledovým / sněhovým lavinám: ANO

přítomnost potenciálně nebezpečných jezer výše proti proudu: ANO

Zdroj: Klimeš (2012); snímky Google Earth, Digital Globe 2013

LEDOVEC:

vzdálenost čela ledovce od jezera: 0 m

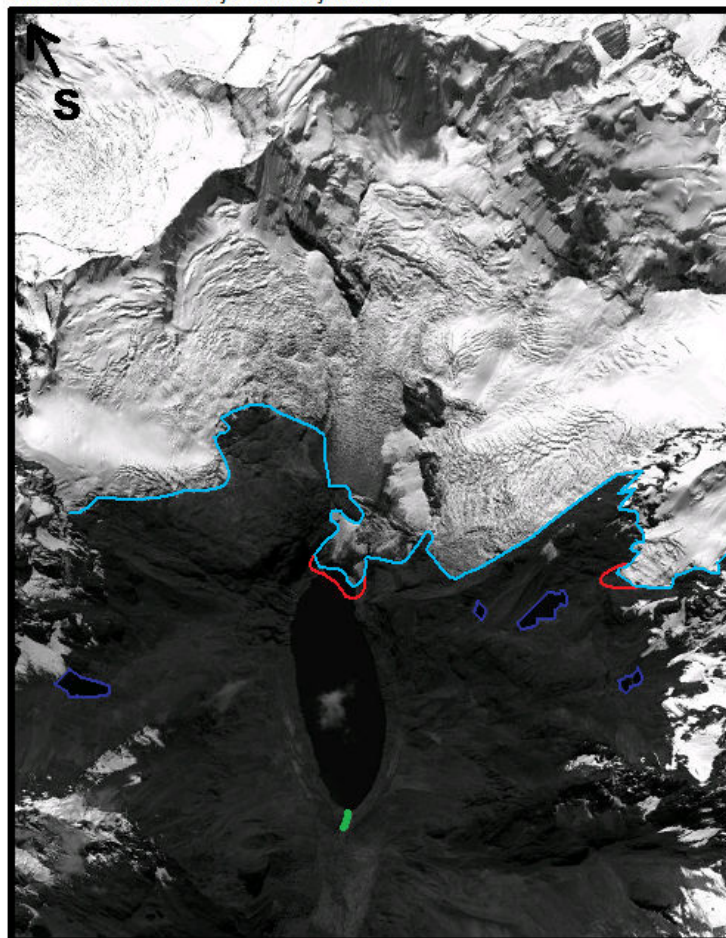
sklon svahu mezi ledovcem a jezerem: -

sklon koncové části ledovcového splazu: 24°





rozloha mateřského ledovce: 3,0 km²

Zdroj: snímky Google Earth, Digital Globe 2013

satelitní snímek okolí jezera Rajucolta



snímek: Google Earth, Digital Globe 2013; datum snímku: 5.5.2012; výška pohledu: 13,5 km

-  rozsah zalednění v 5/2012
-  konce ledovcových splazů v roce 1970
-  jezera situovaná nad jezerem Rajucolta
-  zpevněný výtok z jezera s ochranným valem

HRÁZ:

stavebně technické úpravy: ANO

sklon vnějšího svahu hráze: 23°

převýšení hráze: 14 m

průsak hráze: NE

přítomnost pohřbeného ledu: NE

poměr šířky ku výšce hráze: velký

Zdroj: Výzkumné zprávy INRENA / ANA; přítomnost pohřbeného ledu podle metodiky McKillop & Clague (2007a); poměr šířky ku výšce hráze podle metodiky Huggel et al. (2004)

snímek zachycující stabilizační práce na hrázi jezera v roce 2004



Foto: N. Santillán (INRENA)

Kapitola 5

VÝSLEDKY

První část kapitoly výsledky (viz 5.1) je věnována otázce vhodnosti současných metodických přístupů pro hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca. Vlastní výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti (viz 5.2) sedmi studovaných morényami hrazených jezer (viz 4.3) jsou členěny do čtyřech částí: výsledky hodnocení kvalitativními metodami (viz 5.2.1), výsledky hodnocení kvantitativními metodami (viz 5.2.2), syntéza dosažených výsledků (viz 5.2.3), a výsledky hodnocení novou kvalitativní metodou (viz 5.2.4)

5.1 Vhodnost metod hodnocení pro jezera v pohoří Cordillera Blanca

V sekci 4.2 je stanoveno, podrobně popsáno a zdůvodněno pět skupin parametrů (charakteristik), které je vhodné a žádoucí zohledit v regionálně zaměřené metodě hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca. Jedná se o:

- A) Možnost dynamického svahového pohybu do jezera
- B) Možnost povodňové vlny z jezera situovaného výše proti proudu
- C) Možnost protržení hráze v případě silného zemětřesení
- D) Rozlišení mezi přírodní hrází a stavebně upravenou hrází
- E) Převýšení hráze (poměr převýšení hráze)

Ze současných metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer shrnutých v části 3.1 a 3.2 se jako nejvhodnější pro jezera v pohoří Cordillera Blanca jeví metody, které prezentovali Grabs & Hanisch (1993), Clague & Evans (2000), Reynolds (2003), McKillop & Clague (2007a) a Mergili & Schneider (2011), z nichž každá určitým způsobem zohledňuje tři z pěti stanovených regionálně specifických skupin charakteristik (viz Tab. 15). Žádná z prezentovaných metod však nepostihuje všechna

regionální specifika povodní typu GLOF z morénami hrazených jezera v pohoří Cordillera Blanca. Všechny metody určitým způsobem zohledňují možnost dynamického svahového pohybu do jezera a s výjimkou tří metod také převýšení hráze. Většina metod však nezohledňuje stavební úpravy hráze, možnost protržení v důsledku povodňové vlny z výše položeného jezera a možnost protržení hráze v důsledku silného zemětřesení.

Nová kvalitativní metoda představená v části 3.3 pak zohledňuje celkem čtyři skupiny regionálně specifických parametrů (možnost dynamického svahového pohybu do jezera; částečně rozlišení mezi přírodní a stavebně upravenou hrází, a to zohledněním erodovatelnosti výtoku; převýšení hráze a možnost povodňové vlny z výše položeného jezera). Z tohoto hlediska je tedy právě tato metoda nejvhodnější pro morénami hrazená jezera v pohoří Cordillera Blanca.

Tab. 15: Zohlednění pěti skupin regionálně specifických charakteristik jednotlivými metodami

Autoři metody	Skupina charakteristik				
	A	B	C	D	E
O'Connor et al. (2001)	Částečně (pouze pro pád bloků ledovce)	ne	ne	ne	ano
Costa & Schuster (1988)	ano	ne	ne	ne	ne
Yamada (1993)	ano	ne	ne	ne	ne
Clague & Evans (2000)	ano	ne	ne	Částečně (zpevnění odtokového koryta)	ano
Grabs & Hanisch (1993)	ano	ne	ne	Částečně (konsolidace)	ano
Wang et al. (2008)	ano	ne	ne	ne	ano
Reynolds (2003)	Částečně (pouze pro pád bloků ledovce)	ano	ne	ne	ano
Huggel et al. (2004)	Ano (výskyt nárazových vln)	ne	ne	ne	ano
Wang et al. (2011)	Částečně (pouze pro pád bloků ledovce)	ne	ne	ne	ne
Mergili & Schneider (2011)	ano	ne	ano	ne	ano
McKillop & Clague (2007a)	ano*	ano*	ne	ne	ano*
Metoda prezentovaná v této práci (viz 3.3)	ano	ano	ne	Částečně (erodovatelnost výtoku)	ano

* - charakteristiky zohledněné při tvorbě metody, které však nejsou použity ve finálním výpočtu potenciální nebezpečnosti pro jezera v oblasti Britské Kolumbie

A - Možnost dynamického svahového pohybu do jezera; B - Možnost povodňové vlny z jezera situovaného výše proti proudu; C - Možnost protržení hráze v případě silného zemětřesení; D - Rozlišení mezi přírodní hrází a stavebně upravenou hrází; E - Převýšení hráze (poměr převýšení hráze)

5.2 Výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer

Z důvodu úspory prostoru v tabulkách jsou pro hodnocená jezera v této části práce použity třípísmenné zkratky: Palcacocha (PLC), Jancarurish (JCR), Rajucolta (RJC), Llaca (LLC), Quitacocha (QTC), Tararhua (TRR), Arhueycocha (AUC).

5.2.1 Výsledky hodnocení kvalitativními metodami

Z osmi kvalitativních metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer uvedených v rešeršní části práce (viz 3.1) bylo použito pět z nich bez nutnosti úprav. Zbývající tři metody, které prezentovali Reynolds (2003), Huggel et al. (2004) a Wang et al. (2008) byly použity s jistými obměnami (viz 2.1.1), a to především z důvodů eliminace subjektivní složky, nebo nejasně definovaných metodických postupů.

Výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer podle metodiky představené O'Connor et al. (2001) jsou prezentovány v Tab. 16. Jsou hodnoceny pouze dvě charakteristiky, každé jezero tak může dosáhnout potenciální nebezpečnosti vyjádřené na škále 0 až 2 (0 – nízká potenciální nebezpečnost, 1 – střední potenciální nebezpečnost a 2 – vysoká potenciální nebezpečnost). Pouze jedno jezero dosáhlo hodnocení „vysoká potenciální nebezpečnost“, a to jezero Arhueycocha, které je jednak v přímém kontaktu s ledovcem a zároveň má povrchový odtok. Oproti tomu rovněž pouze jediné jezero dosáhlo hodnocení „nízká potenciální nebezpečnost“, a to Quitacocha. Potenciální nebezpečnost zbylých pěti jezer pak je klasifikována jako střední. Tato jezera jsou buď v přímém kontaktu s ledovcem a zároveň mají nenulové převýšení hráze, nebo již v přímém kontaktu s ledovcem nejsou, ale na druhou stranu mají nulové převýšení hráze.

Tab. 16: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle metodiky, kterou představil O'Connor et al. (2001)

Charakteristika	Jezero						
	PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
Přímý kontakt jezera s ledovcem	ano	ne	ano	ano	ne	ne	ano
Nulové převýšení hráze (povrchový odtok)	ne	ano	ne	ne	ne	ano	ano
Potenciální nebezpečnost (0-2)	1	1	1	1	0	1	2
Potenciální nebezpečnost (0-1)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00	0,50	1,00

Výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti morényami hrazených jezer podle metodiky, kterou představili Costa & Schuster (1988), jsou prezentovány v Tab. 17. Jsou

hodnoceny čtyři charakteristiky a každé jezero tak na škále znázorňující jeho potenciální nebezpečnost může dosáhnout hodnot 0 (minimální potenciální nebezpečnost) až 4 (nejvyšší potenciální nebezpečnost). Všechna jezera dosáhla poměrně vyrovnaného výsledku, a to stupně potenciální nebezpečnosti 2 nebo 3, tzn. střední až vysoké.

Tab. 17: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle metodiky, kterou představili Costa & Schuster (1988)

Charakteristika	Jezero						
	PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
Zahrazení mladou, nezpevněnou morénou	ne	ano	ne	ne	ano	ano	ne
Příkré svahy morénové hráze	ne	ne	ano	ano	ano	ne	ano
Přítomnost čoček pohřbeného ledu	ano	ne	ne	ne	ne	ano	ne
Blízkost potenciálních svahových pohybů	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
Potenciální nebezpečnost (0-4)	2	2	2	2	3	3	3
Potenciální nebezpečnost (0-1)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,75	0,75	0,75

Yamada (1993) rovněž identifikuje potenciálně nebezpečná morénami hrazená jezera na základě čtyřech indikátorů. Výsledná potenciální nebezpečnost tak může být vyjádřena na stupnici od 0 (nízká potenciální nebezpečnost) po 4 (vysoká potenciální nebezpečnost). Z hodnocených jezer dosáhlo jezero Palcacocha splněním všech čtyřech kritérií potenciální nebezpečnosti výsledku interpretovatelného jako „vysoká potenciální nebezpečnost“ (viz Tab. 18). Ostatní jezera splnila dvě nebo tři kritéria.

Tab. 18: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle metodiky, kterou představil Yamada (1993)

Charakteristika	Jezero						
	PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
Přítomnost čoček pohřbeného ledu	ano	ne	ne	ne	ne	ano	ne
Významný objem zadržované vody	ano	ano	ano	ne	ano	ano	ano
Přímý kontakt jezera s ledovcem	ano	ne	ano	ano	ne	ne	ano
Blízkost potenciálních svahových pohybů	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
Potenciální nebezpečnost (0-4)	4	2	3	2	2	3	3
Potenciální nebezpečnost (0-1)	1,00	0,50	0,75	0,50	0,50	0,75	0,75

Clague & Evans (2000) hodnotí šest charakteristik. Potenciální nebezpečnost každého jezera tak je vyjádřena na škále 0 (nízká potenciální nebezpečnost) až 6 (velmi vysoká potenciální nebezpečnost). Jako potenciálně nejnebezpečnější jezero

Tab. 20 (část 2/2): Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle metodiky, kterou představili Grabs & Hanisch (1993)

Charakteristika	Jezero						
	PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
Boční morény náchylné k sesuvům	ano	ano	ne	ano	ano	ne	ano
Nulové převýšení hráze (povrchový odtok)	ne	ano	ne	ne	ne	ano	ano
Průsak hráze	ano	ne	ne	ano	ano	ne	ne
Předchozí GLOFs	ano	ano	ano	ne	ne	ne	ne
Náchylné okolí k horninovým svahovým pohybům	ano	ano	ne	ano	ano	ne	ano
Přítomnost čoček pohřbeného ledu	ano	ne	ne	ne	ne	ano	ne
Potenciální nebezpečnost (0-11)	8	6	4	5	6	5	6
Potenciální nebezpečnost (0-1)	0,73	0,55	0,36	0,45	0,55	0,45	0,55

Wang et al. (2008) hodnotí celkem devět charakteristik, v této práci je však použito pouze osm z nich (viz 2.1.1). Potenciální nebezpečnost každého jezera tak je vyjádřena na škále 0 (nízká potenciální nebezpečnost) až 8 (velmi vysoká potenciální nebezpečnost). Nejvyššího výsledku (6 splněných kritérií z 8 možných) dosáhlo jezero Tararhua (viz Tab. 21). Nejnižší potenciální nebezpečnosti (3 splněná kritéria) bylo dosaženo u jezera Jancarurish.

Tab. 21: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle upravené metodiky, kterou prezentoval Wang et al. (2008)

Charakteristika	Kritická hodnota	Jezero						
		PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
Šířka hráze v koruně	<600 m	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
Sklon vnějšího svahu morénové hráze	>20°	ne	ne	ano	ano	ano	ne	ne
Přítomnost pohřbeného ledu	ANO	ano	ne	ne	ne	ne	ano	ne
Poměr šířky ku výšce hráze	0,1-0,2	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne
Sklon koncové části ledovcového splazu	>8°	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano
Chod teploty a srážek	Teplo+ sucho Teplo + vlhko	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
Poměr převýšení ku výšce hráze	0	ne	ano	ne	ne	ne	ano	ano
Vzdálenost ledovce od jezera	<500 m	ano	ne	ano	ano	ano	ano	ano
Potenciální nebezpečnost (0-8)		5	3	5	4	5	6	5
Potenciální nebezpečnost (0-1)		0,63	0,38	0,63	0,50	0,63	0,75	0,63

Metoda, kterou představil Reynolds (2003) byla rovněž použita s určitými úpravami (viz 2.1.1). V této metodě je potenciální nebezpečnost určena na základě sedmi charakteristik, které jsou dále subjektivně bodově ohodnoceny 0, 2, 10 nebo 50 body (viz 3.1). Nejvyšší hodnoty dosáhlo se 160 body jezero Arhueycocha (viz Tab. 22). Tento výsledek je interpretován jako velmi vysoká potenciální nebezpečnost, kdy akutně hrozí náhlé uvolnění akumulované vody z daného jezera. Rovněž jezera Palcacocha (134 b.) Tararhua (130 b.) a Rajucolta (122 b.) spadají do této kategorie. Oproti tomu potenciální nebezpečnost jezera Llaca s výsledkem 24 bodů je interpretována jako žádná až minimální.

Tab. 22: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle upravené metodiky, kterou prezentoval Reynolds (2003)

Charakteristika	Jezero						
	PLC	JCR	RJC	LLC*	QTC	TRR	AUC
Objem jezera	50	10	50	2	10	10	50
Telení ledovce	10	0	10	0	0	0	10
Možnost pádu odlomených bloků ledu z okolních ledovců	50	10	50	2	10	50	50
Poměr převýšení ku výšce hráze	10	50	2	10	2	50	50
Průsak hráze	2	0	0	0	50	0	0
Přítomnost pohřbeného ledu	2	0	0	0	0	10	0
Možnost povodňové vlny z výše položeného jezera	10	2	10	10	2	10	0
Celkový počet bodů	134	72	122	24	74	130	160
Potenciální nebezpečnost (0-1) [#]	0,38	0,21	0,35	0,07	0,21	0,37	0,46

* Převzato z Reynolds (2003)

[#] - vztaženo k maximálnímu dosažitelnému celkovému počtu 350 b.

Huggel et al (2004) hodnotí potenciální nebezpečnost všech typů ledovcových jezer na základě pěti charakteristik. Za účelem detailnějšího zhodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer byla i v případě této metody originální metodický postup poněkud upraven (viz 2.1.1). Každé hodnocené charakteristice jsou přiděleny 0, 1 nebo 2 body. Celková potenciální nebezpečnost každého jezera je tak vyjádřena na škále 0 až 10 b. Všechna hodnocená jezera dosáhla poměrně vyrovnané potenciální nebezpečnosti v rozmezí čtyři až šest bodů. Potenciálně nejméně nebezpečným ze sedmi studovaných jezer je dle dosažených výsledků jezero Rajucolta, naopak jezery s nejvyšší potenciální nebezpečností jsou Arhueycocha, Palcacocha, Tararhua a Jancarurish (viz Tab. 23).

Tab. 23: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle upravené metodiky, kterou představil Huggel et al. (2004)

Charakteristika	Jezero						
	PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
Typ hráze	2	1	1	1	1	2	1
Poměr převýšení ku výšce hráze	1	2	1	1	1	2	2
Poměr šířky ku výšce hráze	0	0	0	0	0	0	0
Výskyt nárazových vln	2	2	1	2	2	1	2
Výskyt extrémních meteorologických situací	1	1	1	1	1	1	1
Potenciální nebezpečnost (0-10)	6	6	4	5	5	6	6
Potenciální nebezpečnost (0-1)	0,60	0,60	0,40	0,50	0,50	0,60	0,60

5.2.2 Výsledky hodnocení kvantitativními metodami

Ze třech kvantitativních metod shrnutých v rešeršní části práce (viz 3.2) byly použity pouze dvě, a to metody, které prezentovali Wang et al. (2011) a částečně upravená metoda, kterou prezentovali Mergili & Schneider (2011)(viz 2.1.2).

Výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer podle metodiky, kterou představili Wang et al. (2011), jsou prezentovány v Tab. 24. V této metodě je potenciální nebezpečnost každého jezera vyjádřena na stupnici 0 až 1. Jezerem s nejvyšší potenciální nebezpečností bylo s výsledkem 0,95 vyhodnoceno jezero Arhueycocha, následované jezerem Rajucolta (výsledek 0,94). Naopak nejnižšího výsledku (0,54) a tím i nejnižší potenciální nebezpečnosti ze sedmi studovaných jezer dosáhlo jezero Jancarurish. Tento výsledek je dle originální metodiky interpretován jako střední potenciální nebezpečnost.

Tab. 24: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle metodiky, kterou představil Wang et al. (2011)

Charakteristika	Jezero						
	PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
Rozloha mateřského ledovce [km ²]	4,4	4,7	3,0	3,2	0,9	0,8	4,0
Vzdálenost ledovce od jezera [m]	0	540	0	0	60	250	0
Sklon svahu mezi ledovcem a jezerem [°] *	-	50	-	-	48	34	-
Sklon koncové části ledovcového splazu [°]	27	5	24	7	17	33	37
Sklon vnějšího svahu morénové hráze [°]	5	8	23	21	25	7	18
Potenciální nebezpečnost (0-1)	0,85	0,54	0,94	0,60	0,84	0,75	0,95

* v případě, že je jezero v přímém kontaktu s ledovcem (-) byla ve výpočtu použita hodnota sklonu koncové části ledovcového splazu končícího v jezeře

Pro zhodnocení potenciální nebezpečnosti sedmi studovaných jezer podle metodiky kterou prezentovali Mergili & Schneider (2011) bylo nezbytné provést určité úpravy v této metodě (viz 2.1.2). Nejvyššího výsledku potenciální nebezpečnosti dosáhla shodně tři jezera – Arhueycocha, Palcacocha a Llaca, která na škále 0-6 dosáhla stupně 5 (viz Tab. 25). Naopak jezera s nejnižší potenciální nebezpečností jsou jezera Jancarurish a Tararhua, která dosáhla potenciální nebezpečnosti vyjádřené stupněm 3.

Tab. 25: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer podle upravené metodiky, kterou představili Mergili & Schneider (2011)

Charakteristika	Jezero						
	PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
Náchylnost okolí k dynamickým svahovým pohybům	2	2	1	2	2	1	2
Telení ledovce do jezera	1	0	1	1	0	0	1
Seismická aktivita	1	1	1	1	1	1	1
Převýšení hráze	0	0	0	0	0	0	0
Působení externích sil celkem (0-4):	4	3	3	4	3	2	4
Materiál tvořící hráz	2	2	2	2	2	2	2
Převládající způsob odtoku vody z jezera	0	0	0	0	1	0	0
Změna rozlohy jezera v čase	1	0	0	1	0	0	1
Sklon vnějších svahů hráze	-1	-1	0	0	0	-1	0
Působení interních sil celkem (0-4):	2	1	2	3	3	1	3
Potenciální nebezpečnost (0-6)	5	3	4	5	4	3	5
Potenciální nebezpečnost (0-1)	0,83	0,50	0,67	0,83	0,67	0,50	0,83

5.2.3 Syntéza výsledků

Mezi výsledky jednotlivých metod pochopitelně existují rozdíly či rozpory, nicméně jsou zde zřejmé určité shody (viz Tab. 26). K celkovému zhodnocení potenciální nebezpečnosti sedmi studovaných jezer deseti metodami byl vypočítán aritmetický průměr a také vážený průměr výsledků jednotlivých metod. Výsledky jednotlivých metod jsou v aritmetickém průměru rovnocenné. Díky tomu je přirozeně kladen větší důraz na klíčové charakteristiky (takové, které autoři hodnotí i v metodách s celkově nižším počtem hodnocených charakteristik). Vážený průměr pak zohledňuje počet charakteristik, které jsou v jednotlivých metodách hodnoceny a všechny hodnocené charakteristiky tak mají stejnou váhu, některé se však vyskytují vícekrát (viz Tab. 2), což reflektuje jejich preferovanost autory jednotlivých metod. Mezi výsledky aritmetického a váženého průměru deseti metod nebyly zaznamenány výrazné rozdíly (max. 6 % původní hodnoty v případě jezer

Quitacocha a Arhueycocha). Hodnoty aritmetického průměru jsou u většiny jezer vyšší, než hodnoty průměru váženého. Výjimku představují jezera Quitacocha a Palcacocha, u kterých jsou výsledky váženého průměru vyšší, bylo tedy u nich dosaženo vyšší potenciální nebezpečnosti v metodách, které hodnotí vyšší počet charakteristik.

Tab. 26: Aritmetický a vážený průměr výsledků hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer

Autoři metody hodnocení	Počet hodnocených charakteristik	Jezero						
		PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
O'Connor et al. (2001)	2	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00	0,50	1,00
Costa & Schuster (1988)	4	0,50	0,50	0,50	0,50	0,75	0,75	0,75
Yamada (1993)	4	1,00	0,50	0,75	0,50	0,50	0,75	0,75
Clague & Evans (2000)	6	0,50	0,67	0,17	0,50	0,67	0,50	0,50
Grabs & Hanisch (1993)	11	0,73	0,55	0,36	0,45	0,55	0,45	0,55
Wang et al. (2008)	8	0,63	0,38	0,63	0,50	0,63	0,75	0,63
Reynolds (2003)	7	0,38	0,21	0,35	0,07	0,21	0,37	0,46
Huggel et al. (2004)	5	0,60	0,60	0,40	0,50	0,50	0,60	0,60
Wang et al. (2011)	5	0,85	0,54	0,94	0,60	0,84	0,75	0,95
Mergili & Schneider (2011)	8	0,83	0,50	0,67	0,83	0,67	0,50	0,83
Aritmetický průměr		0,65	0,50	0,53	0,50	0,53	0,59	0,70
Vážený průměr*		0,66	0,49	0,51	0,49	0,56	0,57	0,66

* - vahami je počet hodnocených charakteristik

Jezerem s nejvyšší potenciální nebezpečností je podle dosažených výsledků Arhueycocha, která v šesti z deseti aplikovaných metod dosáhla ze sedmi studovaných jezer nejvyššího výsledku (viz Tab. 26). Také aritmetický i vážený průměr všech výsledků potvrzuje tento závěr. Jezero Arhueycocha je následované jezerem Palcacocha, které ve čtyřech případech dosáhlo nejvyšší potenciální nebezpečnosti ze studovaných jezer. Průměrný výsledek z deseti metod vyjádřený na škále 0-1 je pro jezero Arhueycocha 0,70 v případě aritmetického průměru a 0,66 v případě průměru váženého. Pro jezero Palcacocha pak 0,65, respektive 0,66. Následuje jezero Tararhua, které bylo třemi metodami vyhodnoceno jako potenciálně nejnebezpečnější. Poměrně rozporuplné jsou výsledky jezer údolí de los Cedros - Jancarurish a Quitacocha (2x vyhodnocena jako potenciálně nejnebezpečnější ze studovaných, ale zároveň také dva a vícekrát vyhodnocena jako jezera s nejnižší potenciální nebezpečností). Jezerem s nejnižší potenciální nebezpečností ze sedmi studovaných jezer pak je jezero Rajucolta, které bylo

čtyřmi metodami vyhodnoceno jako potenciálně nejméně nebezpečné a zároveň žádnou z metod jako potenciálně nejnebezpečnější, dle průměrných výsledků dále jezera jezera Llaca a Jancarurish. Průměrný výsledek deseti metod hodnocení potenciální nebezpečnosti pro tato tři jezera vyjádřený na škále 0-1 osciluje v případě aritmetického i váženého průměru v rozmezí od 0,49 do 0,53.

V sekci 5.1 je popsána vhodnost jednotlivých metod pro morénami hrazená jezera v pohoří Cordillera Blanca, a to na základě (ne)zohlednění pěti skupin charakteristik odrážejících regionální specifika povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer v této oblasti (viz 4.2). Jako nejvhodnější se ukázaly metody, které prezentovali Grabs & Hanisch (1993), Clague & Evans (2000), Reynolds (2003) a Mergili & Schneider (2011) (a metoda, kterou prezentovali McKillop & Clague, která ovšem nebyla použita). Všechny tyto metody určitým způsobem zohledňují tři z pěti stanovených skupin charakteristik. Tyto čtyři metody dohromady pak zohledňují všech pět stanovených skupin charakteristik.

Průměrné výsledky těchto čtyřech nejvhodnějších metod však víceméně korespondují s výsledky všech deseti metod. Jezero s nejvyšší potenciální nebezpečností je jezero Palcacocha těsně následované jezerem Arhueycocha (viz Tab. 27). Výsledek vyjádřený na škále 0-1 je pro jezero Palcacocha 0,61 v případě aritmetického průměru a 0,64 v případě průměru váženého. Jezero Arhueycocha dosáhlo výsledku 0,59 pro oba průměry. Potenciálně nejméně nebezpečným jezerem ze sedmi studovaných je opět jezero Rajucolta s výsledkem 0,39, respektive 0,40.

Tab. 27: Aritmetický a vážený průměr výsledků hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer čtyřmi nejvhodnějšími metodami

Autoři metody hodnocení	Počet hodnocených charakteristik	Jezero						
		PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
Clague & Evans (2000)	6	0,50	0,67	0,17	0,50	0,67	0,50	0,50
Grabs & Hanisch (1993)	11	0,73	0,55	0,36	0,45	0,55	0,45	0,55
Reynolds (2003)	7	0,38	0,21	0,35	0,07	0,21	0,37	0,46
Mergili & Schneider (2011)	8	0,83	0,50	0,67	0,83	0,67	0,50	0,83
Aritmetický průměr		0,61	0,48	0,39	0,46	0,53	0,46	0,59
Vážený průměr*		0,64	0,49	0,40	0,47	0,53	0,45	0,59

* - vahami je počet hodnocených charakteristik

5.2.4 Výsledky hodnocení novou kvalitativní metodou

Na základě devatenácti charakteristik hodnocených v nově vytvořené metodě (viz Tab. 2, viz 3.3) byla kvalitativně zhodnocena potenciální nebezpečnost studovaných jezer.

Ta teoreticky může být pro každé jezero vyjádřena na škále 0 (minimální potenciální nebezpečnost) až 19 (velmi vysoká potenciální nebezpečnost). Výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer touto metodou jsou poměrně vyrovnané. Všechna jezera dosáhla potenciální nebezpečnosti mezi 10 a 14 body (viz Tab. 28). Jezerem s nejvyšší potenciální nebezpečností je ze studovaných jezer dle této metody jezero Palcacocha, které bylo v syntéze deseti aplikovaných metod vyhodnoceno jako druhé potenciálně nejnebezpečnější jezero (viz výše). Naopak jezery s nejnižší potenciální nebezpečností jsou jezera údolí de Los Cedros - Jancarurish a Quitacocha. Potenciální nebezpečnost zbylých jezer je na stupnici vyjádřena 11 nebo 12 body.

Tab. 28: Potenciální nebezpečnost studovaných jezer na základě nově vytvořené kvalitativní metody

Charakteristika	Jezero						
	PLC	JCR	RJC	LLC	QTC	TRR	AUC
Přímý kontakt jezera s ledovcem	ano	ne	ano	ano	ne	ne	ano
Příkrý sklon svahu mezi ledovcem a jezerem	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
Příkrý konec ledovcového splazu	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano
Přítomnost hlubokých trhlin na ledovci	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
Postup ledovce	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne
Nulové převýšení hráze (povrchový odtok)	ne	ano	ne	ne	ne	ano	ano
Nedostatečně široká koruna hráze	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
Velká rozloha mateřského ledovce	ano	ano	ano	ano	ne	ne	ano
Přítomnost čoček pohřbeného ledu v tělese hráze	ano	ne	ne	ne	ne	ano	ne
Průsak hráze	ano	ne	ne	ano	ano	ne	ne
Příkré vnější svahy morénové hráze	ne	ne	ano	ano	ano	ne	ano
Vegetační kryt morény	ne	ne	ano	ano	ne	ano	ne
Důkazy předchozích GLOFs	ano	ano	ano	ne	ne	ne	ne
Růst jezera	ano	ne	ne	ano	ne	ne	ano
Velký objem zadržované vody	ano	ano	ano	ne	ano	ano	ano
Potenciálně nebezpečná jezera situovaná výše proti proudu	ano	ne	ano	ne	ne	ano	ne
Možnost pádu odlomených bloků ledovce do jezera	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
Možnost sesuvů / skalního řízení do jezera	ano	ano	ne	ano	ano	ne	ano
Erodatelný výtok	ne	ano	ne	ne	ano	ano	ne
Potenciální nebezpečnost (0-19)	14	10	12	11	10	11	12
Potenciální nebezpečnost (0-1)	0,74	0,53	0,63	0,58	0,53	0,58	0,63

Kapitola 6

DISKUSE

V této části práce je jednak diskutována obecně problematika hodnocení možnosti náhlého uvolnění vody akumulované v morénou hrazeném jezeře (viz 6.1), dále jednotlivé metody hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer (viz 6.2), vhodnost metod hodnocení potenciální nebezpečnosti pro jezera v pohoří Cordillera Blanca (viz 6.3) a vlastní výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti sedmi studovaných jezer (viz 6.4).

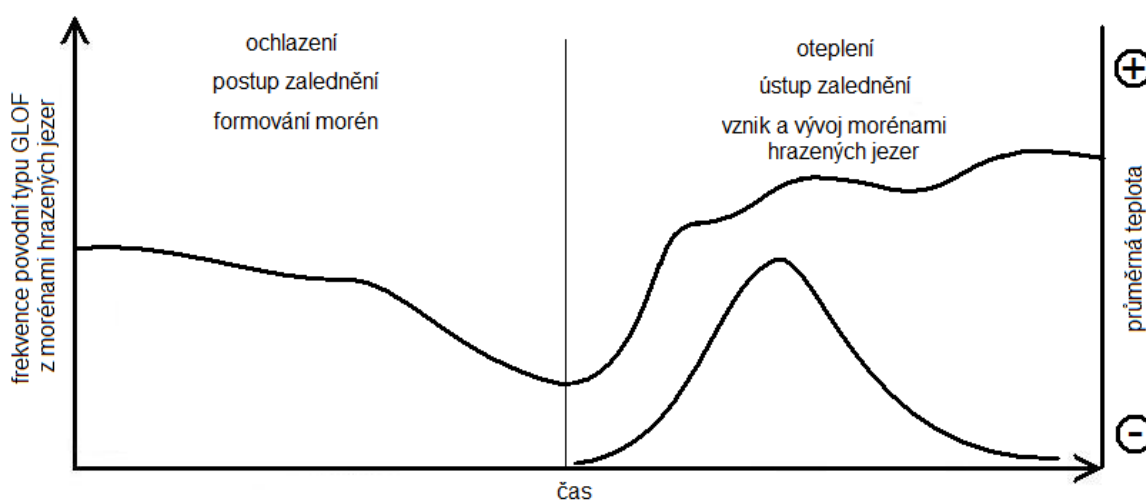
6.1 Problematika hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer

Stanovování možnosti vzniku, případně intenzity průběhu určitého přírodního procesu či jevu je obecně velmi problematické. Také stanovení možnosti náhlého uvolnění akumulované vody z morénou hrazeného jezera (stanovení možnosti vzniku povodně typu GLOF) v sobě skrývá řadu úskalí, která jsou dána především komplexností této otázky. Pravděpodobnost "klasických" hydrometeorologických povodní způsobených extrémními srážkovými úhrny, táním sněhu či kombinací těchto příčin bývá obvykle odvozována z jejich frekvence (dosažení N-letých průtoků), to však je u povodní typu GLOF problematické, jelikož se často jedná pouze o jednorázové "kvazináhodné události" v jejichž prostorovém a časovém výskytu se nevyskytují žádné prokazatelné vzory (Van Steijn, 1996; O'Connor et al., 2001; Hegglin & Huggel, 2008; Emmer, 2013).

Z hlediska geologického chápání času jsou všechna jezera v kontextu vývoje reliéfu pouze dočasná, jejich dlouhověkost se však řádově liší. Nejnižších hodnot je dosahováno u přírodních hrází (jezera hrazená sesuvy, jezera hrazená ledovcem či právě jezera hrazená morénami), které mohou přetrvávat řádově pouze týdny či roky (Costa & Schuster; 1988), naopak extrémně dlouhověká jezera (až první desítky milionů let) bývají jezera vyplňující tektonické deprese (např. Bajkal, či jezera Afrického riftu).

Každé morénou hrazené jezero tak je odsouzeno k zániku a vyvstávají dvě otázky: 1) zda k tomuto zániku dojde katastrofickým způsobem (náhlým uvolněním významného objemu akumulované vody); a 2) v jakém časovém horizontu dojde k zániku. Clague & Evans (2000) uvádějí, že nejvyšší frekvence selhávání morénových hrází je v období ústupu zalednění (viz Obr. 12), které je většinou vázáno na dlouhodobě rostoucí průměrné teploty a / nebo významný pokles srážek.

Obr. 12: Schematický vztah klimatických oscilací, stáří morénových hrází a frekvence povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer (upraveno podle: Clague & Evans, 2000)



Nejvyšší počet potenciálně nebezpečných jezer tedy vzniká, vyvíjí se a zároveň také zaniká na začátku období ústupu zalednění. To lze vysvětlit pomocí dvou argumentů:

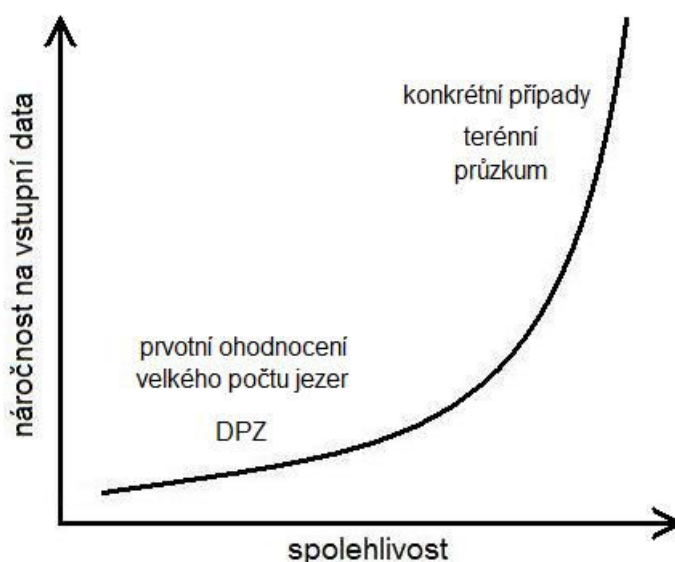
1) mladé morénové hráze jsou tvořeny převážně špatně konsolidovaným netříděným materiálem, jejich svahy nejsou zpevněné například vegetací, a i relativně slabá disturbance může způsobit jejich kolaps (např. Grabs & Hanisch, 1993);

2) morénami hrazená jezera jsou krátce po svém vzniku díky aktuální blízkosti zalednění vystavena nejčastější příčině svého kolapsu, a to pádu odlomených bloků ledovce do jezera a následným nárazovým vlnám.

V prvních letech (desítkách let) existence jezera jsou tedy často zároveň splněny oba obecné předpoklady zániku morénou hrazeného jezera, které uvádějí Richardson & Reynolds (2000), a to nestabilní hráz a přítomnost potenciální příčiny jejího kolapsu (viz níže). Na druhou stranu morénové hráze, které překonají období ústupu ledovce jsou dále považovány za stabilní. Příkladem mohou být velká Alpská morénami hrazená jezera pleistocénního stáří (Strasser et al., 2008).

Pro kvalitní posouzení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer je tedy principiálně nezbytné zahrnout dvě skupiny do určité míry regionálně specifických parametrů: **1) stabilitu samotné morénové hráze** (možnost jejího spontánního kolapsu, resistenci vůči nárazovým vlnám, erozi či zemětřesení), a **2) pravděpodobnost spouštěcí události** (takové události, která má ve svém důsledku potenciál způsobit protržení / přelití morénové hráze)(Richardson & Reynolds, 2000). Obě tyto skupiny parametrů jsou však poměrně obtížně kvantifikovatelné (O'Connor et al., 2001), což má často za následek uplatnění subjektivní složky v hodnocení (viz 6.2). Problémy v hodnocení také přináší proměnlivost některých faktorů. Tato proměnlivost může být sezónní (například kolísání úrovně hladiny vody v jezeře v závislosti na srážkách, tání sněhu či ledovce) nebo nevratná (například svahové pohyby v okolí jezera). Z výše uvedeného vyplývá, že klíčovým předpokladem spolehlivého zhodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer jsou především kvalitní, spolehlivá a aktuální data (viz Obr. 13). Jejich dostupnost, případně úplná absence, také bývá zásadním limitujícím faktorem (viz 6.2).

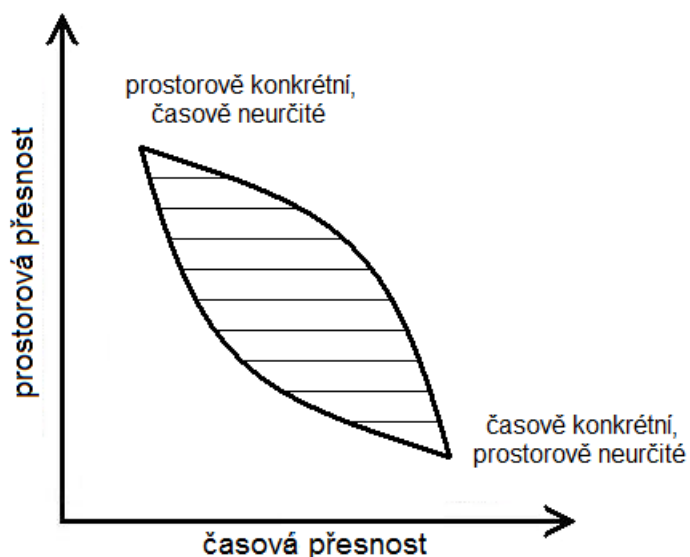
Obr. 13: Schematický vztah spolehlivost ohodnocení potenciální nebezpečnosti a náročnosti na vstupní data



I při maximálním objemu vstupních dat pro hodnocení potenciální nebezpečnosti bude vždy v otázce možnosti náhlého uvolnění vody akumulované v morénou hrazeném jezeře hrát určitou roli nahodilost, respektive nepředpovědatelnost určitých událostí, procesů či jevů, které na ni mohou mít vliv. Tato nepředpovědatelnost prakticky vylučuje možnost prostorově a zároveň časově přesné předpovědi těchto událostí. S přiblížením jednoho z těchto dvou parametrů tedy vždy dojde k rozostření druhého (viz Obr. 14).

Metody hodnocení potenciální nebezpečnosti tak poskytují informaci o předpokladech jednotlivých jezer k náhlému uvolnění akumulované vody, ne však o pravděpodobnosti těchto událostí.

Obr. 14: Schematický vztah prostorové a časové spolehlivosti předpovědi



6.2 Metody hodnocení potenciální nebezpečnosti morénymi hrazených jezer

V této části práce jsou diskutovány (ne)výhody jednotlivých metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morénymi hrazených jezer (viz Tab. 29). Obecně lze říci, že tato problematika je limitována ze dvou směrů – subjektivitou na jedné straně a dostupností vstupních dat, respektive náročností na vstupní data na straně druhé (viz výše). V podstatě je to odrazem charakteru jednotlivých metod. Kvalitativní metody jsou (v případě, že nejsou stanoveny kritické hodnoty, jako je tomu například u metody, kterou prezentovali Wang et al. (2008)) vždy zatíženy subjektivní složkou „expertního posouzení“, tudíž výsledek hodnocení potenciální nebezpečnosti téhož jezera různými hodnotiteli může být odlišný. Oproti tomu u kvantitativních metod je subjektivní složka eliminována, často však za cenu velké náročnosti na vstupní data. Všechny tyto metody (kvalitativní a kvantitativní) nacházejí své uplatnění především při prvotním posuzování potenciální nebezpečnosti jezer dané širší oblasti. Na základě výsledků těchto metod lze u vybraných jezer s nejvyšší potenciální nebezpečností provést terénní průzkum a v ideálním případě, pokud je v ohrožení společnost, také následně implementovat prostorově a finančně efektivní zmírňující opatření.

Tab. 29: Pozitiva a negativa jednotlivých metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer

Autoři metody	pozitiva	negativa
O'Connor et al. (2001)	Zohlednění převýšení hráze	Zohlednění pouze jedné možné příčiny, a to pádu odlomených bloků ledovce do jezera
Costa & Schuster (1988)	Zohlednění více možných příčin uvolnění akumulované vody	Není zohledněno převýšení hráze
Yamada (1993)	Zohlednění více možných příčin uvolnění akumulované vody	Zahrnut objem zadržované vody, který ve své podstatě nehraje v otázce možnosti náhlého uvolnění akumulované vody roli
Clague & Evans (2000)	Zohlednění zpevnění odtokového koryta (odolnost vůči erozi)	Není zohledněna vzdálenost ledovce od jezera
Grabs & Hanisch (1993)	Podrobná metoda zohledňující jedenáct charakteristik	Není zohledněna geometrie hráze (poměr šířky k výšce, sklon svahů)
Wang et al. (2008)	Jsou stanoveny kritické hodnoty u většiny charakteristik	U charakteristiky „rozloha mateřského ledovce“ kritická hodnota není uvedena
Reynolds (2003)	Rozlišení pěti stupňů (bodového ohodnocení) pro každou hodnocenou charakteristiku; zohlednění jezer situovaných výšed proti proudu	Nejsou stanoveny kritické hodnoty pro bodové ohodnocení jednotlivých charakteristik; mimořádně subjektivní charakteristika „složené nebezpečí“
Huggel et al., (2004)	Každá hodnocená charakteristika má tři možné varianty	Velmi nekonkrétní charakteristika „výskyt nárazových vln“; Hodnocení sklonu svahů hráze i u typů jezer, kde to není relevantní; Celková potenciální nebezpečnost může být vyjádřena pouze třemi stupni, nehledě na počet charakteristik, ve kterých bylo tohoto nejvyššího stupně dosaženo
Wang et al. (2011)	Objektivní kvantitativní přístup, poskytující různým autorům shodné výsledky	Zohlednění pouze jedné možné příčiny, a to pádu odlomených bloků ledovce do jezera; nebere však v potaz převýšení hráze
Mergili & Schneider (2011)	Jsou stanoveny kritické hodnoty pro všechny hodnocené charakteristiky	Hodnocení sklonu svahů hráze i u typů jezer, kde to není relevantní (jezera hrazená skalním stupněm)
McKillop & Clague (2007a,b)	Objektivní hodnocení; celý postup tvorby regionálně zaměřené metody opakovatelný pro různé oblasti	Mimořádně velká náročnost na vstupní data při tvorbě regionálně zaměřené metody (18 charakteristik pro každé jezero)

6.3 Vhodnost metod pro jezera v pohoří Cordillera Blanca

Stanovení pěti skupin charakteristik reflektujících regionální specifika morénami hrazených jezer a povodní z morénami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca bylo provedeno na základě analýzy historických událostí. V této oblasti byly zaznamenány následující příčiny povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer: dynamický svahový pohyb do jezera, zemětřesení a povodňová vlna z výše situovaného jezera (Emmer, 2013). U řady událostí se však jedná pouze o pravděpodobnou příčinu a u některých událostí není příčina známá vůbec. Fakt, že zde nebyly zaznamenány některé další příčiny povodně typu GLOF z morénou hrazeného jezera tedy jistě nemusí znamenat, že by k tomu v historii skutečně nedošlo (události s neobjasněnou příčinou). Rovněž do budoucna nelze v této oblasti vyloučit povodeň z morénou hrazeného jezera v důsledku příčiny, která zde doposud nebyla zaznamenána. Z tohoto hlediska je tedy stanovení pěti skupin regionálně specifických charakteristik na základě analýzy příčin u dřívějších povodní typu GLOF diskutovatelné. V ideálním případě by pro tyto jednotlivé skupiny charakteristik také měly být stanoveny váhy, dle jejich důležitosti, to však již výrazně překračuje rámce cílů této práce.

6.4 Výsledky hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer

Mezi jednotlivými metodami hodnocení potenciální nebezpečnosti sedmi studovaných jezer došlo ve výsledcích k poměrně shodě (viz 5.2.3). Je však otázkou, do jaké míry je tento fakt ovlivněn hodnocením obdobných či stejných charakteristik napříč různými metodami (viz Tab. 2), jelikož část klíčových charakteristik se v různé formě vyskytuje ve většině metod (např. vzdálenost čela ledovce od jezera, či (poměr) převýšení hráze). Rovněž může být diskutována relevantnost dosažených výsledků z hlediska vhodnosti daných metod pro jezera v pohoří Cordillera Blanca. Přestože žádná z metod nezohledňuje všechny skupiny regionálně specifických charakteristik povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer v oblasti Cordillera Blanca (viz 5.1), dosažené výsledky poměrně dobře korespondují s reálnými událostmi, konkrétně s povodní typu GLOF z jezera Palcacocha v roce 2003 (Vilímek et al., 2005a), jelikož toto jezero bylo vyhodnoceno, spolu s jezerem Arhueycocha, jako potenciálně nejvíce nebezpečné ze sedmi studovaných jezer. Z tohoto hlediska tedy lze dosažené výsledky považovat za výsledky s určitou relevantní vypovídající hodnotou.

Kapitola 7

ZÁVĚRY

Prvním cílem práce bylo zhodnocení potenciální nebezpečnosti sedmi vybraných morénami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca. Za tímto účelem bylo shrnuto jedenáct metod hodnocení potenciální nebezpečnosti (osm charakterizovatelných jako kvalitativní a tři jako kvantitativní), a deset z nich bylo následně aplikováno na studovaná jezera. Jedná se o jezera Palcacocha, Jancarurish, Rajucolta, Llaca, Quitacocha, Tararhua a Arhueycocha, která jsou v rámci této oblasti řazena mezi velká (objem zadržované vody v řádech 10^5 až 10^7 m³) a která tak v případě náhlého uvolnění byt' jen části akumulované vody mají potenciál způsobit značné škody. Vstupní data pro hodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer byla získána analýzou snímků DPZ, při terénním průzkumu v květnu / červnu 2012 a z nepublikovaných výzkumných zpráv institutu INRENA / ANA v Huarázu.

Jezerem s nejvyšší potenciální nebezpečností bylo na základě syntézy výsledků deseti použitých metod vyhodnoceno jezero Arhueycocha následované jezerem Palcacocha. Jezero Arhueycocha bylo vyhodnoceno jako potenciálně nejnebezpečnější ze studovaných jezer šesti metodami z deseti, jezero Palcacocha čtyřmi. Rovněž aritmetický a vážený průměr výsledků deseti metod (vahami výsledků jednotlivých metod byl počet hodnocených charakteristik) potvrdil tyto dílčí výsledky. Jezero Arhueycocha dosáhlo potenciální nebezpečnosti vyjádřené na stupnici 0-1 výsledku 0,70 pro aritmetický průměr a 0,66 pro vážený průměr, jezero Palcacocha 0,65, respektive 0,66. Tato jezera tak mají nejvyšší předpoklady k náhlému uvolnění (části) akumulované vody a tento výsledek tak reálně koresponduje s událostí z roku 2003, kdy došlo k náhlému uvolnění části akumulované vody právě z jezera Palcacocha. V pomyslném pořadí potenciální nebezpečnosti následuje jezero Tararhua s výsledkem 0,59, respektive 0,57.

Jezerem s nejnižší potenciální nebezpečností bylo vyhodnoceno jezero Rajucolta, které bylo čtyřmi metodami vyhodnoceno jako potenciálně nejméně nebezpečné a zároveň žádnou z metod jako potenciálně nejnebezpečnější. Rovněž jezera Llaca

a Jancarurish jsou, dle syntézy dosažených výsledků deseti metod, mezi sedmi studovanými jezery řazena mezi potenciálně méně nebezpečná. Tato tři jezera dosála téměř totožné potenciální nebezpečnosti vyjádřená na škále 0-1 hodnotami 0,49 až 0,53 pro aritmetický i vážený průměr. Rozporuplného výsledku pak bylo dosaženo v případě jezera Quitacocha, které bylo vyhodnoceno dvakrát jako potenciálně nejnebezpečnější a rovněž dvakrát jako potenciálně nejméně nebezpečné.

Druhým cílem práce pak bylo zhodnocení vhodnosti současných metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer pro jezera v pohoří Cordillera Blanca. Na základě předchozích výzkumů a analýzy příčin povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer v této oblasti bylo autorem diplomové práce stanoveno pět skupin charakteristik (parametrů), které odrážejí regionální specifika povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer v této oblasti. Jedná se o:

- A) Možnost dynamického svahového pohybu do jezera
- B) Možnost povodňové vlny z jezera situovaného výše proti proudu
- C) Možnost protržení hráze v případě silného zemětřesení
- D) Rozlišení mezi přírodní hrází a stavebně upravenou hrází
- E) Převýšení hráze (poměr převýšení hráze)

Vhodnost metod pro jezera v pohoří Cordillera Blanca byla posouzena na základě (ne)zohlednění těchto pěti skupin charakteristik. Všechny metody určitým způsobem zohledňují možnost dynamického svahového pohybu do jezera, jakožto celosvětově nejfrekventovanější příčinu povodní typu GLOF z morénami hrazených jezer. Většina metod také (převážně kvalitativně) zohledňuje převýšení hráze. Zřídka je však rozlišeno mezi přírodní hrází a hrází se stavebně-technickými úpravami, rovněž možnost povodňové vlny z výše položeného jezera a možnost protržení hráze v případě silného zemětřesení není většinou metod zohledněna, což je zřejmě důsledkem poměrně problematické kvantifikovatelnosti těchto skupin charakteristik. Ukázalo se, že žádná ze současných metod hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer nezohledňuje všechny tyto stanovené skupiny charakteristik. Současné metody zohledňují nejvýše tři skupiny charakteristik z pěti stanovených. Jedná se o metody, které prezentovali Grabs & Hanisch (1993), Clague & Evans (2000), Reynolds (2003), McKillop & Clague (2007a,b) a Mergili & Schneider (2011). Zároveň bylo provedeno zhodnocení potenciální nebezpečnosti studovaných jezer pouze na základě těchto nejhodnějších metod, které společně postihují všech pět stanovených skupin charakteristik. Jezerem s nejvyšší potenciální nebezpečností bylo vyhodnoceno jezero Palcacocha, následované jezerem Arhueycocha, naopak jezerem s nejnižší potenciální nebezpečností bylo

vyhodnoceno jezer Rajucolta. Tyto výsledky tak víceméně korespondují s celkovými výsledky všech metod (viz výše).

Na základě syntézy všech nepřekrývajících se kvalitativně hodnotitelných charakteristik byla také vytvořena nová kvalitativní metoda zohledňující celkem devatenáct charakteristik. Maximum zohledněných charakteristik v dosavadních metodách přitom bylo jedenáct, a to v metodě, kterou prezentovali Grabs & Hanisch (1993). Jedná se tedy o nejdetailnější metodu hodnocení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer. Tato nová metoda také zohledňuje nejvyšší počet regionálně specifických skupin charakteristik pohoří Cordillera Blanca, a to čtyři. Nezohledňuje pouze možnost protržení morénové hráze jezera v případě silného zemětřesení. Potenciální nebezpečnost studovaných jezer zhodnocená touto metodou vyjádřená na škále 0-1 je v rozmezí od 0,53 v případě jezer údolí de Los Cedros – Jancarurish a Quitacocha (nejnižší potenciální nebezpečnost) do 0,74 v případě jezera Palcacocha (nejvyšší potenciální nebezpečnost ze sedmi studovaných jezer). Tyto výsledky jsou rovněž ve shodě s celkovými výsledky ostatních metod.

Globální klimatická změna a na ni vázaný ústup zalednění vede v pohoří Cordillera Blanca ke vzniku a vývoji všech typů potenciálně nebezpečných jezer, včetně jezer hrazených morénami. Prvním krokem v managementu rizika vázaného na tato jezera je identifikace a objektivní zhodnocení jejich potenciální nebezpečnosti. Tato práce demonstruje, že současné přístupy k hodnocení potenciální nebezpečnosti nejsou pro morénami hrazená jezera pohoří Cordillera Blanca zcela vhodné (nezohledňují všechny stanovené skupiny charakteristik odrážejících regionální specifika povodní typu GLOF v této oblasti). Z výše uvedených důvodů je pro relevantní posouzení potenciální nebezpečnosti morénami hrazených jezer v pohoří Cordillera Blanca nezbytná jejich inventarizace a zároveň vývoj nové, objektivní a regionálně zaměřené metody hodnocení potenciální nebezpečnosti. To je také hlavním cílem navazujících prací.

LITERATURA

- ALEAN, J. (1985): Ice avalanches: some empirical information about their formation and reach. *Journal of Glaciology*, 31(109), 324-333.
- AMES, A.M. (1985): Causas de catastrofes de origen glaciar. Electroperú S.A., Huaráz (Peru), 4 s.
- AMES, A.M., FRANCOU, B. (1995): Cordillera Blanca - glaciares en la historia. *Bull. Inst. fr. Études andines*, 24 (3), 37-64.
- BAJRACHARYA, B., SHRESTHA, A.B., RAJBHANDARI, L. (2007): Glacial lake outburst floods in the Sagarmatha region. *Mountain Research and Development*, 27(4), 336-344.
- BENN, D.I., EVANS, D.J.A. (1998): *Glaciers & Glaciation*. Hodder Education, London, 734 s.
- BLOWN, I.G., CHURCH, M. (1985): Catastrophic lake drainage within the Homathko River basin, British Columbia. *Can. Geotech. J.* 22, 551-563.
- BOLCH, T., PETERS, J., YEROGOV, A., PRADHAN, B., BUCHROITHNER, M., BLAGOVESHCHENSKY, V. (2011): Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan. *Natural Hazards*, 59, 1691-1714.
- 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*, 5, 271-280.
- BROGGI, J.A. (1942): Informe preliminar sobre la exploracion y estudio de las condiciones de estabilidad de las lagunas de la Cordiller Blanca. Lima, 14 s.
- CACERES, A.M. (1974): Liquidacion de obra "Consolidacion laguna Palcacocha" 1973-1974. Electroperú S.A., Huaráz (Peru), 12 s.
- CACERES, A.M. (1977): Consolidacion laguna Llaca proyecto – segunda etapa. Electroperú, Huaráz (Peru), 13 s.

- CAREY, M. (2005): Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global and Planetary Change*, 47, 122-134.
- CAREY, M., HUGGEL, CH., BURY, J., PORTOCARRERO, C., HAEBERLI, W. (2012): An integrated socio-environmental framework for glacial hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112, 733-767.
- CLAGUE, J.J. EVANS, S.G. (2000): A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1763-1783.
- CONCHA, J.F. (1951): Origen de las lagunas. Corporación Peruana del Santa, división de geología y seguridad de lagunas, Huaraz (Peru), 4 s.
- CONCHA, J.F. (1952): Sintesis de los trabajos efectuados por la comision de las lagunas de la Cordillera Blanca. Ministerid de Fomento, Comision de Control de las Lagunas de la Cordillera Blanca, Lima, 16 s.
- COSTA, J.E. SCHUSTER, R.L. (1988): The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1054-1068.
- DING, Y., LIU, J. (1992): Glacial lake outburst flood disasters in China. *Annals of Glaciology* 16, 180-184.
- DUSSAILLANT, A., BENITO, G., BUYTAETR, W., CARLING, P., MEIER, C., ESPINOZA, F. (2009): Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: an increasing hazard? *Natural Hazards*, 54, 469-481.
- ELECTROPERÚ (1992): Obra de emergencia desague de laguna 513-A. Electroperú S.A., Huaraz (Peru), 68 s.
- ELECTROPERÚ (1995): Desague laguna Tararhua. Electroperú S.A., Huaraz (Peru), 43 s.
- EMMER, A. (2013, v tisku): Causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in Cordillera Blanca (Peru), North American Cordillera and Central Asia. *AUC Geographica*, 2.
- ENGEL, Z., ŠOBR, M., YEROKHIN, S.A. (2012): Changes of Petrov glacier and its proglacial lake in the Akshirak massif, central Tien Shan, since 1977. *Journal of Glaciology*, 58, 388-398.

- EVANS, S.G. (1987): The breaching of moraine-dammed lakes in the Southern Canadian Cordillera. Proceedings, International Symposium on Engineering Geological Environment in Mountainous Areas, Beijing, 2, 141–150.
- EVANS, S.G., CLAGUE, J.J. (1994): Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments. *Geomorphology*, 10, 107-128.
- GEORGES, C. (2004): The 20th century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Arctic, Antarctic, and Alpine Res.*, 36, 100-107.
- GIRÁLDEZ, C.M. (2011): Glacier evolution in the South West slope of Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Peru). Master project, Universidad Complutense de Madrid, 61 s.
- GRABS, W.E., HANISCH, J. (1993): Objectives and prevention methods for glacier lake outburst floods (GLOFs). In: *Snow and Glacier Hydrology (Proceedings of the Kathmandu Symposium, November 1992)*, Great Yarmouth (UK), 341-352.
- HAEBERLI, W., KÄÄB, A., MÜHLL, D.V., TEYSSEIRE, P. (2001): Prevention of outburst floods from periglacial lakes at Grubengletscher, Valais, Swiss Alps. *Journal of Glaciology*, 47, 111-122.
- HARRISON, S., GLASSER, N., WINCHESTER, V., HARESIGN, E., WARREN, C., JANSSON, K.A. (2006): Glacial lake outburst flood associated with recent mountain glacier retreat, Patagonian Andes. *Holocene*, 16, 611-620.
- HEGGLIN, E. HUGGEL, C. (2008): An integrated assessment of vulnerability to glacial hazards - a case study in the Cordillera Blanca, Peru. *Mountain Research and Development*, 28, 299-309.
- HUAMAN, A.C. (1985): Estudio Geologico de seguridad fisica de la laguna en formacia 513-A. Electroperú S.A., Huaráz (Peru), 15 s.
- HUGGEL, C., HAEBERLI, W., KÄÄB, A., BIERI, D., RICHARDSON, S. (2004): An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 1068-1083.
- HUGGEL, C., KÄÄB, A., HAEBERLI, W., KRUMMENACHER, B. (2003): Regionalscale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 1–16.

- HUGGEL, C., KÄÄB, A., HAEBERLI, W., TEYSSEIRE, P., PAUL, F. (2002): Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 316-330.
- CHEN, C., WANG, T., ZHANG, Z., LIU, Z., (1999): Glacial lake outburst floods in upper Nainchu River Basin, Tibet. *Journal of Cold Regions Engineering*, 13, 199–212.
- ITURRIZAGA, L. (2005): Historical glacier-dammed lakes and outburst floods in the Karamba valley (Hindukush-Karakoram), *Geo Journal*, 63, 1-47.
- IVES, J.D., SHRESTHA, B.R., MOOL, P.K. (2010): Formation of Glacial Lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF Risk Assessment. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Kathmandu (Nepal), 56 s.
- JANSKÝ, B., ŠOBR, M., ENGEL, Z. (2010): Outburst flood hazard: Case studies from the Tien-Shan Mountains, Kyrgyzstan. *Limnologica*, 40(4), 358-364.
- KASER, G. (1988): Report on field work in the Cordillera Blanca. Universität Innsbruck, Institut für Geographie, Innsbruck, 9 s.
- KASER, G. (1995): Some notes on behaviour of the tropical glaciers. *Bull. Inst. fr. Études andines*, 24, 671-681.
- KATTELMANN, R. (2003): Glacial lake outburst floods in the Nepal Himalaya: a manageable hazard? *Natural Hazards*, 28, 145–154.
- KATTELMANN, R. WATANABE, T. (1997): Draining Himalayan glacial lakes before they burst. In: *Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control* (Proceedings of the Conference held at Anaheim, California, June 1996), The Netherlands, 337-343.
- KERSHAW, J.A., CLAGUE, J.J., EVANS, S.G. (2005): Geomorphic and sedimentological signature of a two-phase outburst flood from moraine-dammed Queen Bess Lake, British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 1-25.
- KLIMEŠ, J. (2012): Geomorphology and natural hazards of the selected glacial valleys, Cordillera Blanca, Peru. *AUC Geographica* 47, 25-31.
- KORUP, O., TWEED, F. (2007): Ice, moraine and landslide dams in mountainous terrain. *Quaternary science reviews*, 26, 3406-3422.
- KOŠŤÁK, B., VILÍMEK, V., ZAPATA, M.L. (2002): Registration of microdisplacements at a Cordillera Blanca fault scarp. *Acta Montana, ser. A Geodynamics*, 19(123), 61-74.

- LLIBOUTRY, L. (1977): Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. II. Movement of a covered glacier embedded within a rock glacier. *Journal of Glaciology*, 18(79), 255-273.
- LLIBOUTRY, L., MORALES, B.A., PAUTRE, A., SCHNEIDER, B. (1977a): Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of moranic dams, their causes and prevention. *Journal of Glaciology*, 18(79), 239-254.
- LLIBOUTRY, L., MORALES, B.A., SCHNEIDER, B. (1977b): 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*, 18(79), 275-290.
- LÜ, R., TANG, B., LI, D. (1999): Introduction of debris flow resulted from glacial lakes failed. In: *Debris Flow and Environment in Tibet, Chengdu (China)*, 69-105.
- MARK, B.G. (2002): Observations of modern deglaciation and hydrology in the Cordillera Blanca. *Acta Montana, ser. A Geodynamics*, 19(123), 23-36.
- MCKILLOP, R.J., CLAUGE, J.J. (2007a): Statistical, remote sensing-based approach for estimating the probability of catastrophic drainage from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia. *Global and Planetary Change*, 56, 153-171.
- MCKILLOP, R.J., CLAUGE, J.J. (2007b): A procedure for making objective preliminary assessments of outburst flood hazard from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia. *Nat Hazards*, 41, 131-157.
- MERGILI, M., SCHNEIDER, J.F. (2011): Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1447-1462.
- MOOL, P.K., SHRESTHA, B.R., IVES, J.D. (2010): *Glacial Lakes and Associated Floods in the Hindu Kush – Himalaya; informational sheet #2/10*. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Kathmandu (Nepal), 4 s.
- MORALES, B.A. (1966): *Estudio de las lagunas Rajucolta y Cashan*. Corporación Peruana del Santa, división de geología y seguridad de lagunas, Lima, 8 s.
- MORALES, B.A. (1968): *Estudios de Ablación en la Cordillera Blanca*. In: *Boletín oficial del instituto nacional de glaciología*, Lima, 52-57.
- MORALES, B.A., ZAMORA, M.C., AMES, A.M. (1979): *Inventario de lagunas y glaciares del Perú*. In: *Boletín de la sociedad geológica del Perú, parte III*, Lima, 63-82.

- NARAMA, C., DUISHONAKUNOV, M., KÄÄB, A., DAIYROV, M., ABDRAKHMATOV, K. (2010): The 24 July 2008 outburst flood at the western Zyndan glacier lake and recent regional changes in glacier lakes of the Teskey Ala-Too range, Tien Shan, Kyrgyzstan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 647-659.
- O'CONNOR, J.E., HARDISON, J.H., COSTA, J.E. (2001): Debris flows from failures of Neoglacial-age moraine dams in the Three Sisters and Mount Jefferson Wilderness areas, Oregon. U.S. Geological Survey, Reston (Virginia), 93 s.
- 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*, 8, 121-140.
- OPPENHEIM, V. (1946): Sobre las lagunas de Huaráz. In: *Boletín de la sociedad geologica del Peru*, Sociedad geologica del Peru, Lima, 68-80.
- PETRAKOV, D.A., KRYLENKO, I.V., CHERNOMORETS, S.S., TUTUBALINA, O.V., KRYLENKO, I.N., SAKHMINA, M.S. (2007): Debris flow hazard of glacial lakes in the Central Caucasus. In: *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. Chen & Major (eds.), Millpress, The Netherlands, 703-714.
- PORTOCARRERO, C.R. (1984): *Desastres naturales – geologia, causas, efectos y prevenciones*. Electroperú S.A., Huaráz (Peru), 10 s.
- PORTOCARRERO, C.R. (1990): 1500 años de variabilidad climática a partir de muestras de hielo importancia de la investigación glaciada desde el punto de vista del clima y del desarrollo de los pueblos. Hidrandina S.A., Huaraz (Peru), 11 s.
- PORTOCARRERO, C.R. (1995): *Proyecto prioritario del afianzamiento hídrico del río Santa*. Hidrandina S.A., Huaraz (Peru), 28 s.
- QUINCEY, D.J., RICHARDSON, S.D., LUCKMAN, A., LUCAS, R.M., REYNOLDS, J.M., HAMBREY, M.J., GLASSER, N.F. (2007): Early recognition of glacial lake hazards in the Himalaya using remote sensing datasets. *Global and Planetary Change*, 56, 137-152.
- REYNOLDS, J.M. (2003): *Development of glacial hazard and risk minimisation protocols in rural environments. Methods of glacial hazard assessment and management In the Cordillera Blanca, Peru*. Reynolds Geo-Sciences Ltd., Flintshire (UK), 72 s.

- RICHARDSON, S.D. (2010): Remote sensing approaches for early warning of GLOF hazard in the Hindu Kush – Himalayan region. Unites Nations International Strategy For Disaster Reduction (UN/ISDR). 35 s.
- RICHARDSON, S.D., REYNOLDS, J.M. (2000): An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65/66, 31-47.
- RYDER, J.M. (1991): Geomorphological processes associated with an ice-marginal lake at Bridge Glacier, British Columbia. *Géographie physique et Quaternaire*, 45, 35–44.
- SHRESTHA, A.B. (2010):, Managing flash flood risk in the Himalayas; informational sheet #1/10. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Kathmandu (Nepal), 4 s.
- SINGERLAND, R., VOIGHT, B. (1982): Evaluating hazard of landslide-induced water waves. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 108, 504–512.
- SOLOMINA, O., JOMELLI, V., KASER G., AMES, A., BERGER, B., POUYAUD, B. (2007): Lichenometry in the Cordillera Blanca, Peru: „Little Ice Age“ moraine chronology. *Global and Planetary Change*, 59, 225-235.
- THOMPSON, L., MOSLEY-THOMPSON, E., HENDERSON, K. (2000): Ice-core paleoclimate records in tropical South America since the last glacial maximum. *Journal of Quaternary Sciences*, 15: 377-394
- VELIZ, B.J. (1974): Informe geológico glaciológico sobre condiciones de seguridad del cono aluvionico de Huaráz. Electroperú S.A., Huaráz (Peru), 23 s.
- VILÍMEK, V. (2002): Paleogeographical evolution of Central Andes. *Acta Montana, ser. A Geodynamics*, 19(123), 7-21.
- VILÍMEK, V., KLIMEŠ, J., ZAPATA, M.L. (2005a): Glacial lake outburst flood in the areas of Huarás, Cordillera Blanca, Peru, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*. 39, 115-124.
- VILÍMEK, V., ZAPATA, M.L., KLIMEŠ, J., PATZELT, Z., SANTILLÁN, N. (2005b): Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru. *Landslides*, 2, 107-115.
- WANG, X., 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*, 28, 310-317.
- WANG, W. YAO, T., GAO, Y., YANG, X., KATTEL, D.B.: (2011): A First-order Method to Identify Potentially Dangerous Glacial Lakes in a Region of the Southeastern Tibetan Plateau. *Mountain Research and Development*, 31, 122- 130.

- WECS - Water and Energy Commission Secretariat (1987): Study of glacier lake outburst floods in Nepal Himalaya. In: WECS Interim Report. Kathmandu (Nepal).
- WORNİ, R., STOFFEL, M., HUGGEL, CH., 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*, 11, 134-145.
- YAMADA, T. (1993): Glacier lakes and their outburst floods in the Nepal, Himalaya. *Water and energy comission secretariat, Kathmandu (Nepal)*, 37 s.
- YAMADA, T. (1998): Glacier lake and its outburst flood in the Nepal Himalaya. *Japanese Society of Snow and Ice, Tokyo*, 96 s.
- YAO, M., ZHANG S. (1997): Fuzzy consistent matrix and its applications in soft science. *Systems Engineering*, 15, 54–57.
- ZAMORA, M.C. (1982): Informe sobre la inspeccion de lagunas de la Cordillera Blanca con helicoptero de la F.A.P. Electroperú S.A., Huaráz (Peru), 11 s.
- ZAPATA, M.L. (1970): Informe geologico laguna Llaca. *Corporación Peruana del Santa, Recursos hidraulicos, Huaráz (Peru)*, 9 s.
- ZAPATA, M.L. (1992): Desague laguna 513-A. *Electroperú S.A., Huaráz (Peru)*, 6 s.
- ZAPATA, M.L. (2002): La dinamica glaciär en lagunas de la Cordillera Blanca. *Acta Montana, ser. A Geodynamics*, 19(123), 37-60.