

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie



Inženýrskogeologické problémy v okolí vysokohorských ledovcových jezer

Engineering geological problems around high mountain glacial lakes

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ema Pilná

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jan Jerman, M.Sc., Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: RNDr. Mgr. Jan Klimeš, Ph.D.

Praha, 2024

Prohlášení

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

V Praze, 11. 12. 2024

Podpis:

Poděkování

V první řadě děkuji svému vedoucímu panu Mgr. Janu Jermanovi, M.Sc., Ph.D. za odborné vedení této bakalářské práce, za poskytnutí cenných rad, ale také za vstřícnost a trpělivost. Dále bych ráda poděkovala panu RNDr. Mgr. Janu Klimešovi, Ph.D. za odbornou konzultaci v oboru geomorfologie.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na inženýrskogeologické problémy spojené s vysokohorskými ledovcovými jezery. Ledovcová jezera představují unikátní geomorfologický jev, jehož vznik, vývoj a stabilitu ovlivňují klimatické, geologické a hydrologické faktory. Cílem práce je analyzovat klíčová rizika spojená s těmito jevy, včetně svahových pohybů, hydraulického porušení a eroze, a představuje inženýrské a technické přístupy k jejich monitorování a prevenci. Práce rovněž zohledňuje environmentální a sociální aspekty, jako je vliv ledovcových jezer na ekosystémy a místní obyvatelstvo. Pomocí konkrétních příkladů z různých částí světa jsou zdůrazněny specifické problémy a přístupy k jejich řešení. Výsledky přispívají k pochopení dynamiky těchto jezer a poskytují obecný přehled zákonitostí a souvislostí, které mohou být relevantní pro další výzkum.

Klíčová slova: ledovcová jezera, svahové pohyby, monitoring, inženýrská geologie, geomorfologie

Abstract

This bachelor's thesis focuses on engineering geological problems associated with high mountain glacial lakes. Glacial lakes represent a unique geomorphological phenomenon whose formation, evolution, and stability are influenced by climatic, geological, and hydrological factors. The aim of the thesis is to analyze key risks associated with these phenomena, including slope movements, hydraulic failure, and erosion, and presents engineering and technical approaches to their monitoring and prevention. The thesis also considers environmental and social aspects, such as the impact of glacial lakes on ecosystems and local communities. By using specific examples from different parts of the world, key issues and approaches to their resolution are highlighted. The results contribute to understanding the dynamics of these lakes and provide a general overview of principles and interrelations that may be relevant for further research.

Keywords: glacial lakes, slope movements, monitoring, engineering geology, geomorphology

Obsah

1. Úvod	8
2. Základní terminologie	9
3. Charakteristika vysokohorského prostředí	10
3.1. Ledovcová jezera	12
3.1.1. Morénová jezera	12
3.1.2. Proglaciální jezera.....	13
3.1.3. Subglaciální jezera.....	13
3.1.4. Cirková jezera	14
3.2. Sedimenty v okolí jezer.....	16
3.2.1. Charakteristiky z pohledu mechaniky zemin	17
3.3. Typické příklady jezer ilustrujících různé geologické podmínky	19
4. Inženýrskogeologická rizika v okolí ledovcových jezer.....	21
4.1. Svahové pohyby	22
4.1.1. Klasifikace svahových pohybů podle Nemčoka, Paška a Rybáře	22
4.1.2. Klasifikace svahových pohybů podle Varnese	26
4.1.3. Prostorové rozložení svahových pohybů	27
4.2. Hydraulické porušení a eroze	30
4.2.1. Prostorové rozložení hydraulického porušení a eroze	30
4.3. Příčiny a faktory svahových pohybů.....	31
4.3.1. „Spouštěče“ svahových pohybů	33
4.3.2. Změny v objemu vody – vliv na stav a stabilitu jezer	34
5. Technické a inženýrské přístupy	35
5.1. Metody sledování jezer a jejich stability	35
5.1.1. Satelitní a dálkové metody.....	36
5.1.2. Geotechnické a hydrogeologické metody	37
5.2. Základní inženýrské zásahy pro prevenci rizik.....	39
6. Enviromentální a sociální aspekty	40
6.1. Dopad na ekosystémy v okolí jezer	40
6.2. Dopad na místní obyvatelstvo a socio-ekonomické faktory.....	41
7. Diskuse	42

8. Závěr.....	44
9. Seznam literatury	45

Seznam obrázků

Obrázek 1: Morénové jezero Palcacocha	12
Obrázek 2: Proglaciální jezero č. 513, Cordillera Blanca.....	13
Obrázek 3: Místo, pod kterým se nachází jezero Vostok	13
Obrázek 4: Schéma jezera Vostok – průřez.....	14
Obrázek 5: Cirkové jezero Oberer Gaisalpsee	14
Obrázek 6: Zrnitostní křivky typických sedimentů	19
Obrázek 7: Lago de Marboré	20
Obrázek 8: Third Lake (jedno z jezer Gokyo Lakes)	20
Obrázek 9: Jezero Pacacocha	21
Obrázek 10: Schematický náčrt řetězce impulsu pohybu hmoty u ledovcových jezer ...	29
Obrázek 11: Schéma nebezpečí vysokohorských oblastí	33
Obrázek 12: CBFEWS aplikovaný na řece	39

Seznam tabulek

Tabulka 1: Klasifikace ploužení podle Nemčok et al. (1974) a Malgot et al. (1992)	23
Tabulka 2: Klasifikace sesouvání podle Nemčok et al. (1974) a Malgot et al. (1992).....	24
Tabulka 3: Klasifikace stékání podle Nemčok et al. (1974) a Malgot et al. (1992)	25
Tabulka 4: Klasifikace říčení podle Nemčok et al. (1974) a Malgot et al. (1992)	26

1. Úvod

Vysokohorská ledovcová jezera představují unikátní geomorfologický fenomén, vznikající v důsledku složitých interakcí mezi klimatickými změnami, geologickými procesy a hydrologickými vlivy. Tato jezera vznikají nejčastěji v oblastech, kde se ledovce postupně zmenšují nebo ustupují, a v jejich okolí zanechávají typické morfologické útvary, jako jsou morény, karová jezírka nebo trogy (Ziegler, 1996). Ledovcová jezera nejsou pouze geologickou zajímavostí, ale také důležitým environmentálním a sociálním prvkem horských oblastí, kde mohou mít zásadní vliv na místní ekosystémy a lidské aktivity (Shrestha & Aryal, 2011).

V posledních desetiletích se problematika ledovcových jezer dostala do popředí zájmu inženýrské geologie, především v souvislosti s globálními klimatickými změnami. Tání ledovců způsobené zvyšováním průměrných teplot vede nejen k nárůstu počtu a velikosti těchto jezer, ale také ke zvýšení rizika přírodních katastrof, jako jsou například záplavy způsobené prasknutím morénových hrází (tzv. glacial lake outburst floods – GLOFs) (Carrivick & Tweed, 2013). Tyto katastrofy mohou mít devastující dopady na níže položené oblasti, včetně ztrát na životech, zničení infrastruktury a změn v hydrologických a geomorfologických podmínkách.

Struktura práce zahrnuje několik klíčových kapitol, které systematicky pokrývají nejdůležitější aspekty této problematiky. Nejprve jsou v práci rozebrány geologické a geomorfologické charakteristiky vysokohorského prostředí, dále se zabývá druhy ledovcových jezer a jejich vývojem a vlivy okolních sedimentů na stabilitu. Následuje probrání základních rizik, zahrnující například riziko svahových pohybů, hydraulických porušení a erozi. Poté se práce zaměřuje na výhody a nevýhody různých metod monitoringu stability jezer a zmiňuje základní inženýrské zásahy pro prevenci. Poslední kapitola je věnována environmentálním a sociálním aspektům, tedy vlivu ledovcových jezer na místní ekosystémy, biodiverzitu a lidské komunity. Celá práce se zároveň opírá o konkrétní příklady jezer z různých částí světa, které ilustrují rozmanitost geologických podmínek a problémů. Důraz je kladen na propojení teoretických poznatků s praktickými příklady – bez zaměření na jedinou konkrétní oblast, čímž se práce snaží přispět k hlubšímu pochopení problematiky a zvýšení povědomí o významu ledovcových jezer z pohledu inženýrské geologie.

Práce by měla poskytnout základní přehled problematiky ledovcových jezer z inženýrskogeologického pohledu a na rozdíl od prací, které se zaměřují na jednotlivé případy nebo konkrétní oblasti, se tato práce snaží identifikovat společné rysy a rizika, které lze nalézt napříč různými typy ledovcových jezer a jejich prostředím.

Cílem této práce by měl být obecný přehled informací o vysokohorském prostředí, ledovcových jezerech a metodách jejich monitoringu, který by mohl sloužit jako základ pro budoucí výzkum problematiky ledovcových jezer v globálním měřítku.

2. Základní terminologie

V této kapitole se zaměřím na definování klíčových pojmů, které jsou důležité pro pochopení tématu inženýrskogeologických problémů vysokohorských ledovcových jezer. Tyto termíny tvoří základ pro interpretaci a porozumění odborným výrazům používaným v této práci.

Ledovcové jezero je jezero, které vzniklo v důsledku činnosti ledovce. Tato jezera se typicky tvoří buď přímo na povrchu ledovce (tzv. supraglaciální jezera), nebo v jeho blízkosti v údolí či sníženině, kterou ledovec zformoval (Bolch et al., 2019). Jezera jsou obvykle obklopena přírodními přehradami, jako jsou morény nebo skalní prahy (Benn & Evans, 2014).

Morénová hráz je přírodní bariéra tvořená nahromaděným materiálem, který byl transportován a uložen ledovcem (Benn & Evans, 2014). Tyto přehrady jsou náchylné k erozi, prosakování vody a mechanické nestabilitě, což zvyšuje riziko selhání a následných povodní (Richardson & Reynolds, 2000).

GLOF (Glacial Lake Outburst Flood), neboli povodeň způsobená protržením ledovcového jezera, je extrémní hydrologická událost, kdy dochází k náhlému a masivnímu uvolnění vody z ledovcového jezera (Ives et al., 2010). Tento jev je často spojen s destabilizací morénových přehrad, náhlým zřícením ledových bloků nebo zemětřesením (Watanabe et al., 2016). Důsledky GLOF mohou zahrnovat devastaci krajiny, ztráty na životech a majetku a dlouhodobé ekologické dopady (Carrivick & Tweed, 2013).

Periglaciální prostředí je oblast v blízkosti ledovců, která je charakteristická opakovaným promrzáním a rozmrzáním půdy (Allen et al., 2017).

Cryosféra označuje části Země, kde se voda nachází ve formě ledu nebo sněhu, včetně ledovců, permafrostu a sněhové pokrývky (Bolch et al., 2019). Tato sféra hraje klíčovou roli v hydrologickém cyklu a stabilitě vysokohorských ekosystémů.

Tání ledovců je proces, kdy se pevná ledová hmota mění na vodu v důsledku zvýšených teplot. Tento jev je jedním z hlavních faktorů přispívajících ke vzniku a expanzi ledovcových jezer, což zvyšuje riziko jejich protržení (Bolch et al., 2019).

Definice těchto termínů poskytují čtenáři základní orientaci v problematice a připravují půdu pro další diskusi o specifických inženýrskogeologických aspektech vysokohorských ledovcových jezer.

3. Charakteristika vysokohorského prostředí

Abychom se mohli zaměřit na ledovcová jezera, musíme si přednostně představit prostředí, ve kterém se nacházejí. Ovšem vysokohorské prostředí lze charakterizovat dvěma různými způsoby – z pohledu geomorfologie a z pohledu geologie – proto si nejdříve definuji, jaký je mezi nimi rozdíl.

Geomorfologie se zaměřuje na současné tvary reliéfu a procesy, které je formují – studuje například erozní činnost ledovců, formování trogů, karů nebo morén. Klade tedy důraz na povrchové procesy a jejich dynamiku (Benn & Evans, 2014).

Geologie se zabývá vnitřní strukturou a složením zemské kůry, která tvoří základ reliéfu. Soustředí se na vznik hornin, tektonické pohyby a dlouhodobé geologické procesy, které vedly ke vzniku hor a jejich složení (Kachlík & Chlupáč, 2001).

Při zjednodušení pro laika by se tedy dalo říct, že geomorfologie řeší „jak se hory formují dnes“ (např. vliv ledovců apod.) a geologie odpovídá na otázku „z čeho a jak hory vznikají“ (např. z tektonických procesů a geologických jednotek).

Geomorfologická charakteristika

Geomorfologie vysokohorských oblastí se zabývá studiem tvarů zemského povrchu a procesů, které formují horské prostředí. Tudiž z hlediska geomorfologie je vysokohorské prostředí charakterizováno především nadmořskou výškou a klimatem – vysokohorské oblasti jsou definovány nadmořskou výškou, obvykle nad 2 500–3 000 m n. m., v závislosti na zeměpisné šířce (Ziegler, 1996). Klimatické podmínky bývají drsné, s nízkými teplotami, vysokou intenzitou slunečního záření, častým mrazem a sněhem. Tyto faktory uvádí do pohybu geomorfologické procesy, jako je např. mrazové zvětrávání, soliflukce (pomalý pohyb půdy) nebo ledovcová eroze (Highland & Bobrowsky, 2008).

Další významnou charakteristikou vysokohorského prostředí je dominance ledovcových a periglaciálních procesů. Ledovce modelují reliéf skrze erozní činnost (tvorba karů, trogů a ostrých hřebenů) a ukládají materiál (morény, drumliny). Periglaciální procesy probíhají v oblastech ovlivněných mrazem, ale bez trvalého ledu, kde dochází k cyklickému promrzání a tání půdy, což vede k tvorbě polygonálních půd, kamenných moří a soliflukčních teras (Allen et al., 2017).

Dalším faktorem je strmý reliéf a erozi podporující geodynamika. Vysokohorský terén je často velmi strmý a náchylný k erozi. Kombinace strmých svahů a intenzivního mrazového zvětrávání často způsobuje časté skalní řícení, sesuvy půdy a kamenné laviny (Highland & Bobrowsky, 2008).

Z hlediska hydrologie jsou vysokohorské oblasti často zdrojem řek a obsahují četná ledovcová jezera. Vodní režim je ovlivněn táním ledu a sněhu, což způsobuje sezónní výkyvy průtoků a riziko povodní.

Posledním ale nejvýznamnějším aspektem jsou tvary reliéfu. Vzhledem k tomu, že geomorfologie je disciplínou studující tvary zemského povrchu a procesy tyto tvary dále formující, tak je pro geomorfologii důležité tyto tvary specifikovat a zařadit. Například kary (karová údolí), trogy (ledovcová údolí tvaru U), ostré hřebeny (*arêtes*) a pyramidy (horníky) jsou typickými tvary vzniklými vlivem ledovcové eroze. Morény a sedimentární valy jsou zase běžné akumulární formy (Nývlt, 2013).

Geologická charakteristika

Hlavním faktorem z hlediska geologie by bylo horninové složení – vysokohorské oblasti bývají často tvořeny odolnými horninami, jako jsou krystalické (granity, ruly) nebo metamorfované horniny, které dobře odolávají erozi. Tyto horniny obvykle tvoří jádra horských masivů (např. Alpy, Himaláje) (Hambrey & Alean, 2004). V méně odolných oblastech se mohou nacházet sedimentární horniny (vápence, pískovce), které podléhají rychlejší erozi, což může vést k tvorbě krasových forem nebo hlubokých údolí (Benn & Evans, 2014).

Dalším geologickým faktorem by byla tektonika a deformace. Vysokohorské oblasti jsou často výsledkem orogenezí, tj. vrásnění a vyzdvihování horských masivů při kolizích tektonických desek (např. Himaláje vznikly srážkou Indické a Eurasijské desky) (Benn & Evans, 2014). Časté jsou zlomy, deformace, ale také intenzivní tektonická činnost, která ovlivňuje stabilitu svahů a riziko sesuvů (Highland & Bobrowsky, 2008).

Další roli v geologické charakteristice by hrály geologické procesy obecně. Metamorfóza, magmatismus – mnoho vysokohorských oblastí vzniká během dlouhodobých geologických procesů, kdy jsou původní horniny přeměněny tlakem a teplotou (Clague & Evans, 2000). Eroze a exhumace – zvětrávání a eroze nám postupně odhalují hluboké části zemské kůry, které se obvykle vyskytují hluboko pod povrchem, což nám dále umožňuje rozsáhlejší studium hornin (Richardson & Reynolds, 2000).

Z geologického hlediska jsou rovněž vysokohorské oblasti skvělá ložiska nerostných surovin. Oblasti mohou obsahovat nerostné suroviny, jako jsou kovy (měď, zlato) nebo průmyslové minerály (křemen, slídy), jež vznikají během magmatických a metamorfních procesů (Benn & Evans, 2014).

Vysokohorské prostředí je tedy tvořeno jedinečnou kombinací geomorfologických a geologických faktorů. Na jedné straně geomorfologie zdůrazňuje aktuální tvary reliéfu a procesy, které je formují (Hambrey & Alean, 2004). Zatímco geologie poskytuje základní pochopení složení a vzniku těchto horských oblastí, včetně vlivu tektoniky, horninového složení a dlouhodobých geologických procesů. Právě toto propojení povrchových a vnitřních procesů činí vysokohorské oblasti fascinujícím předmětem studia a klíčovým faktorem pro pochopení vzniku a charakteru jejich jezer. Následující část se proto zaměří přímo na vysokohorská jezera, jejichž existence a vlastnosti jsou úzce spjata s geomorfologickými a geologickými podmínkami okolního prostředí.

3.1. Ledovcová jezera

Jezero je ze všech stran uzavřená *přirozená* nádrž stojaté vody nahromaděné v depresi zemského povrchu, která nesouvisí přímo s mořem (Ziegler, 1996; Kachlík & Chlupáč, 2001). Tato definice vylučuje nahromadění slaných stojatých vod, jež jsou spojená s mořem (jako limany, laguny, atoly) a uměle vytvořené vodní nádrže (přehradní nádrže, rybníky) (Ziegler, 1996).

Ledovcová jezera jsou přirozené vodní nádrže, které vznikají v důsledku tání ledovců a akumulace vody v prohlubních nebo za přirozenými bariérami vytvořenými glaciálními procesy (Ziegler, 1996). Jejich vznik a vývoj jsou ovlivněny řadou faktorů, jako jsou geologické podmínky a klimatické změny. Tyto nádrže se nacházejí převážně v horských oblastech, kde ledovce ustupují a odhalují nové povrchové útvary.

3.1.1. Morénová jezera

Morénová jezera vznikají za tzv. čelní „morénou“, která tvoří jejich přirozenou hráz. Tyto hráze jsou složeny z glaciálních sedimentů, jako je štěrk, písek a hlína, které jsou přenášeny a uvolňovány ledovcem. Morénové hráze bývají citlivé na erozi, která může vést k protržení jezera, zejména při náhlém zvýšení tlaku vody nebo v důsledku seismických událostí (Emmer & Cochachin, 2013). Například jezero Palcacocha v pohoří Cordillera Blanca vzniklo v pleistocénu za morénovou hrází. Obsahuje ledová jádra, což je činí zvláště náchylným k destabilizaci vlivem tání ledu (Klimeš et al., 2016).



Obrázek 1: Morénové jezero Palcacocha

Zdroj: (<https://www.andeanlaci.org/palcacocha-glof-bombas-tiempo-cordillera-blanca-1/>)

3.1.2. Proglaciální jezera

Tato jezera se formují před čelem ledovce v prohlubních vytvořených glaciální erozí nebo za morény. Proglaciální jezera jsou zásobována tající vodou a ledovými bloky uvolněnými z aktivního ledovce, což je činí náchylnými k poměrně rychlým změnám objemu i rozsahu v závislosti na klimatu (Carrivick & Tweed, 2013). Například jezero č.513 (Cordillera Blanca) vzniklo akumulací vody za morénovou hrází a skalním prahem a je typickým příkladem pro oblasti, kde dochází k rychlému ústupu ledovců (Klimeš et al., 2014).



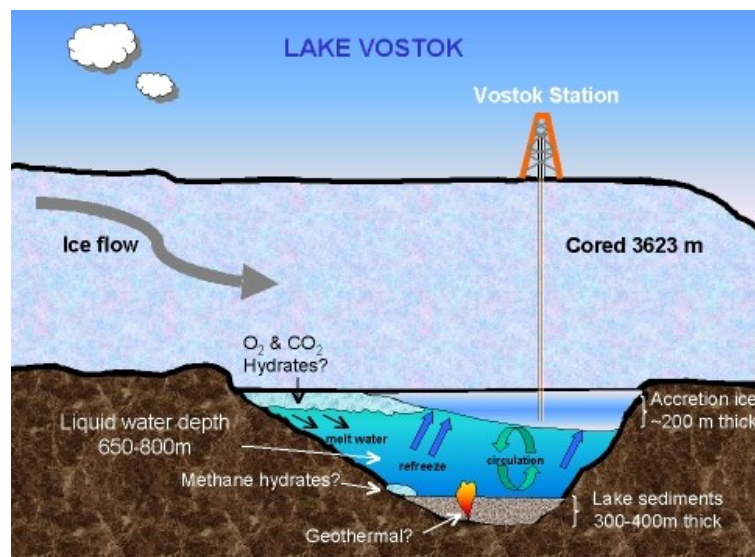
Obrázek 2: Proglaciální jezero č. 513, Cordillera Blanca
Zdroj: (<https://www.anden.at/en/laguna513.php>)

3.1.3. Subglaciální jezera

Tato jezera se nacházejí pod masou ledu a zůstávají izolována od přímého vlivu klimatu. Mohou se vyskytnout v hlubších částech ledovce a voda v nich většinou zůstává tekutá díky geotermálnímu teplu a tlaku ledu. Kupříkladu subglaciální jezero Lake Vostok na Antarktidě je izolované pod ledovcovou pokrývkou a představuje unikátní prostředí pro výzkum extrémních ekosystémů (Benn & Evans, 2014).



Obrázek 3: Místo, pod kterým se nachází jezero Vostok
Zdroj: (<https://www.atlasobscura.com/articles/giant-secret-lake-may-have-just-been-discovered-in-antarctica>)



Obrázek 4: Schéma jezera Vostok – průřez

Zdroj: (<https://theconversation.com/life-in-lake-vostok-the-link-between-antarctica-and-extra-terrestrials-5334>)

Tato jezera nejsou pro téma mé práce relevantní, protože se nenacházejí ve vysokohorském prostředí a jejich vlastnosti a reakce se tak značně liší.

3.1.4. Cirková jezera

Cirková jezera vznikají v prohlubních vytvořených glaciální erozí pod čarou zalednění. Jsou obvykle menších rozměrů a jsou relativně stabilní, dokud jsou jejich břehy chráněny před erozí (Hambrey & Alean, 2004). Mezi příklady by mohlo patřit mnoho jezer v Alpách, jako například jezero Oberer Gaisalpsee, které je typickým cirkovým jezerem, jež si zachovává svou stabilitu díky skalním břehům (Hambrey & Alean, 2004).



Obrázek 5: Cirkové jezero Oberer Gaisalpsee

Zdroj: (<https://www.oberstdorf.de/alpininfo/allgaeuer-alpen/berg-tal/gewaesser/gaisalpseen.html>)

Když srovnám typy ledovcových jezer, pak jezera sdílí nejen některé základní procesy vzniku, ale i vývoj, zatímco stabilita záleží na konkrétních podmínkách okolí. Vývoj ledovcových jezer je dynamický a často odráží změny v přirozených podmínkách okolí. Proto se teď zaměřím na základní faktory ovlivňující vývoj ledovcových jezer:

1. Tání ledovců

Ledovce jsou přímým zdrojem vody ledovcových jezer a jejich vliv je tudíž klíčový. Tání ledovce často sice zásobuje jezero vodou, ale může ho i úplně zničit. Takzvaná „zlatá střední cesta“ je ve vztahu k tání pro ledovcová jezera víc než důležitá, protože příliš mnoho vody může způsobit protržení hráze a následné vypuštění jezera, ovšem kdyby přísun vody příliš klesnul – voda by se následně mohla postupně vypařovat až by došlo k vyschnutí (Clague & Evans, 2000).

2. Sedimentace

Dalším faktorem je nepochybně sedimentace, protože sedimenty z okolních svahů či ze samotného ledovce postupně zanáší jezero, což vede ke snížení hloubky a postupnému zarůstání jezera (Benn & Evans, 2014).

3. Eroze hrází

Hráze jezera je ovlivňována mnoha podmínkami, ale převážně časem – opakující se koloběh tání a zamrznání způsobuje erozi okrajových bariér, což může vést k jejich průvalům. Protržení hráze je časté zejména u morénových jezer, kde je hráze tvořena různorodými sedimenty, které jsou tak méně stabilní (Emmer & Vilímek, 2013).

4. Klimatické změny

Klimatické změny řídí dopad všech ostatních faktorů, neboť právě teplotní výkyvy jsou spouštěčem tání a jsou tak zdrojem vody v jezeře (Eriksson, 2011). Teplotní změny ovšem podněcují mrazové zvětrávání, a zvyšují tak nestabilitu stávajících nádrží a riziko jejich protržení (Highland & Bobrowsky, 2008).

Závěrem lze říct, že vznik a vývoj ledovcových jezer je výsledkem složitého souboru geomorfologických a klimatických procesů. Tato jezera představují dynamické systémy, jejichž vlastnosti a stabilita se mění v průběhu času v závislosti na přísunu tání, sedimentaci a vlivu eroze. Specifický charakter každého jezera je však také úzce spjat se sedimenty v jejich okolí, které hrají klíčovou roli při formování jezerního dna, břehů i přirozených hrází.

Právě různé typy sedimentů, jejich vlastnosti a vztah k morfologii okolí budou analyzovány v následující podkapitole. Zaměřím se na to, jak jednotlivé typy podloží ovlivňují stabilitu jezerních hrází a celého okolí, a jak mohou přispívat ke zvýšení nebo snížení rizik.

3.2. Sedimenty v okolí jezer

Ledovcová jezera jsou značně ovlivněna typem zemin v jejich okolí, neboť různé horniny a zeminy vykazují odlišné vlastnosti, které ovlivňují jejich náchylnost k erozi, propustnost, svahovou stabilitu a celkovou odolnost vůči vnějším vlivům. V této podkapitole proberu jednotlivé typy „jezerních sedimentů“ se zaměřením na jejich specifické vlastnosti a vliv na stabilitu jezer.

Glaciální sediment

Till, nebo také glaciální sediment, jsou špatně vytríděné usazeniny transportované a uložené ledovcem, hrají klíčovou roli ve stabilitě a vývoji ledovcových jezer. Velikost částic se pohybuje od velkých balvanů až po drobný materiál o velikosti jílu (Bennett, 2009), proto jsou často popisovány jako balvanité hlíny ('Geosciences', 2021). V okolí ledovcových jezer se glaciální till často vyskytuje jako subglaciální (např. lodgement till) a supraglaciální (např. flow till) (Sedláček, 2008; Benn & Evans, 2014):

- Subglaciální till: Sedimenty tvořící dno nebo podloží jezera, často pevné a stabilní, ale s nízkou propustností, což omezuje infiltraci vody a ovlivňuje hydrologii jezera.
- Supraglaciální till: Materiál pocházející z povrchu ledovců, ukládající se v blízkosti ustupujícího ledu, může být náchylný k erozi a transportu do jezer.
- Melt-out till: Sedimenty vznikající pomalým odtáváním ledu přispívají k jemnozrnné sedimentaci na dně jezer, čímž ovlivňují jeho stratigrafii.

Morénové sedimenty

Jsou specifickým typem glaciálních tillů, které tvoří akumulace na určitých místech kolem ledovce, jako jsou čelní, boční nebo spodní morény (Benn & Evans, 2014). Morénové sedimenty se od glaciálního tillu liší tím, že mohou zahrnovat i přemístěný materiál jako např. sediment přepravený vodními toky nebo gravitačními procesy po ústupu ledovce (Sedláček, 2008). Jsou jedním z nejběžnějších sedimentů v okolí ledovcových jezer, protože často tvoří přehradní hráze.

Tyto sedimenty zahrnují směs materiálů od jemných jílových částic, písku, kamení až po balvany (Benn & Evans, 2014). Vysoká pórovitost morénových sedimentů umožňuje prosakování vody, což může narušovat vnitřní strukturu hráze - příkladem je Lago Palcacocha v peruánských Andách, kde průsaky a eroze způsobily destabilizaci hráze a vedly k ničivé povodni v roce 1941 (Emmer et al., 2018). Vzhledem k tomu, že morénové sedimenty nebývají pevně zhutněné, tak jsou velmi náchylné k erozi nebo proplachování při zvýšeném objemu vody, což časem může vést ke kolapsu morénové hráze a průvalu jezera (Carrivick & Tweed, 2013). Navíc tání ledových ker uvnitř morény dále zvyšuje riziko destabilizace. Při zvýšeném tlaku vody dochází k erozi, která postupně oslabuje přehradní

bariéru – tento jev je patrný u Gokyo Lakes v Nepálu, kde opakované tání a eroze vedly ke kolapsu hráze a k povodňovým událostem (Reynolds et al., 1998; Ives et al., 2010).

Svahové sedimenty

Sedimenty jezerních svahů představují materiál, který se mechanickým zvětráváním a erozí uvolňuje z okolních skalních stěn. Vysokohorské prostředí s ostrými teplotními změnami je ideální pro vznik těchto sedimentů, neboť střídání zamrzání a tání podporuje rozpad hornin (Highland & Bobrowsky, 2008). Tyto sedimenty jsou často transportovány gravitačními procesy, jako jsou skalní říční, suťové proudy nebo laviny, a mohou přímo ovlivnit objem materiálu usazovaného v jezerech. Přítomnost těchto sedimentů v okolí jezera zvyšuje pravděpodobnost znečištění vody a sedimentace dna. Navíc mohou významně přispět k tvorbě nánosových kuželů, které se při silných dešťových epizodách mohou stát nestabilními (Clague & Evans, 2000).

Role permafrostu

Permafrost, nebo také trvale zmrzlá půda, jež často stabilizuje svahy a hráze, bývá v důsledku klimatických změn vystaven degradaci. Tání permafrostu uvolňuje sedimenty a oslabuje morénové hráze, čímž zvyšuje riziko sesuvů – tento proces je zásadní zejména v oblastech, kde tání permafrostu odhaluje nestabilní vrstvy skal (Huggel et al., 2012; Allen et al., 2017).

3.2.1. Charakteristiky z pohledu mechaniky zemin

Sedimenty v okolí ledovcových jezer vykazují specifické mechanické a hydraulické vlastnosti, které zásadně ovlivňují jejich stabilitu a chování při zatížení. Klíčové sedimenty zahrnují glaciální till, morénové sedimenty a svahovou suť na jezerních svazích. Tyto materiály se liší nejen zrnitostním složením, ale také pevností, stlačitelností a propustností.

Mechanické a hydraulické vlastnosti

Mechanické vlastnosti sedimentů zahrnují jejich pevnost a stlačitelnost, zatímco hydraulické vlastnosti se týkají schopnosti sedimentů propouštět vodu. Rozdíly v těchto vlastnostech jsou dány především jejich zrnitostním složením a uspořádáním částic:

Glaciální till

- **Pevnost:** Glaciální till vykazuje vysokou soudržnost díky jemnozrnným matricím, jako je jíl a silt, které vyplňují mezery mezi hrubšími částicemi (štěrk, balvany). To dodává sedimentu značnou smykovou pevnost, zejména v zhutněném stavu (Benn & Evans, 2014).
- **Stlačitelnost:** Stlačitelnost je obecně nízká díky pevné matici, ale může se zvýšit při nasycení vodou (Clarke et al., 2015).

- **Hydraulické vlastnosti:** Till má obecně nízkou propustnost, což omezuje odtok vody a přispívá ke zvýšení pórových tlaků (Highland & Bobrowsky, 2008).

Morénové sedimenty

- **Pevnost:** Morénové sedimenty mají proměnlivou pevnost v závislosti na velikostní frakci. Jemnozrnné frakce (silt a jemný písek) přispívají k soudržnosti, zatímco hrubozrnné frakce (štěrk, balvany) zlepšují odolnost vůči smykovému zatížení (Benn & Evans, 2014).
- **Stlačitelnost:** Vzhledem k nehomogennímu složení a nízké zhutněnosti je stlačitelnost vyšší než u glaciálního tillu (Emmer & Cochachin, 2013).
- **Hydraulické vlastnosti:** Pórovitost morénových sedimentů umožňuje relativně nízkou propustnost vody, což zvyšuje riziko eroze a průsaků při vysokých hladinách vody (Richardson & Reynolds, 2000).

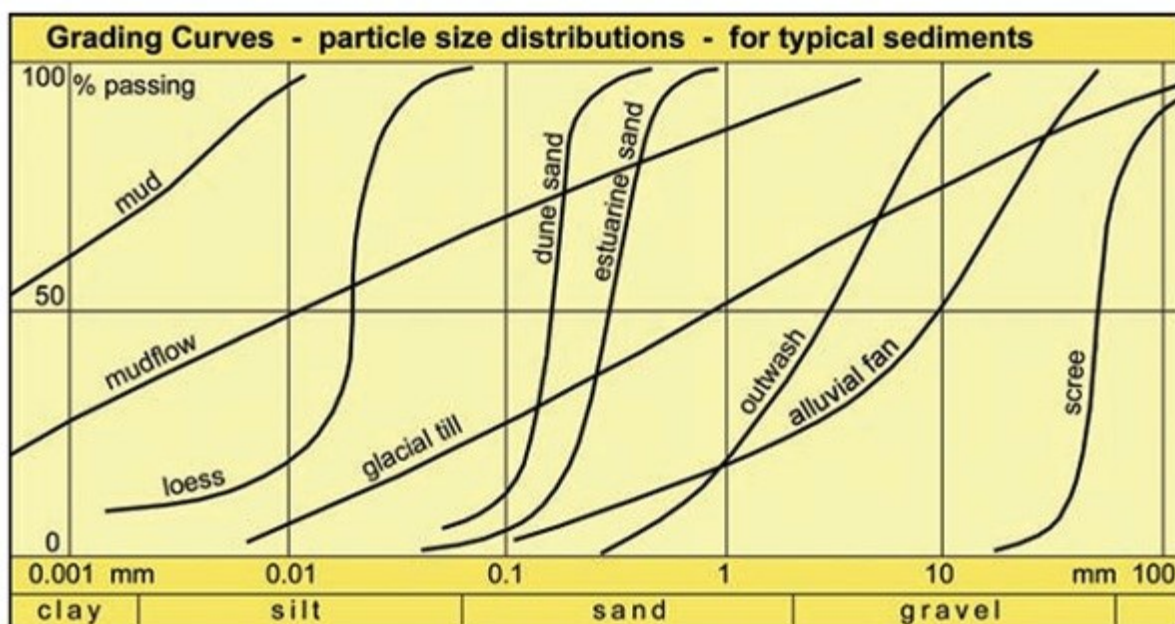
Svahová suť

- **Pevnost:** Svahová suť vykazuje nízkou soudržnost, protože je tvořena převážně hrubými částicemi (oblázky, štěrk) s minimálním podílem jemnozrnných matric. Její pevnost se zvyšuje s tříděním a zhutněním materiálu (Highland & Bobrowsky, 2008).
- **Stlačitelnost:** Nízký obsah jemných částic zajišťuje nízkou stlačitelnost (Hambrey & Alean, 2004).
- **Hydraulické vlastnosti:** Vysoká propustnost díky velkým pórům mezi hrubými částicemi umožňuje rychlý odtok vody, což snižuje riziko nárůstu pórových tlaků (Clague & Evans, 2000).

Zrnitostní křivky

Zrnitostní křivky poskytují grafické znázornění velikostní distribuce částic v sedimentu, což umožňuje porovnat rozdíly:

- **Glaciální till:** Zrnitostní křivky tillu mají široké rozpětí velikostí od hlíny po balvany a často vykazují multimodální rozložení, což odráží různé procesy ukládání (např. lodgement a ablace) (Benn & Evans, 2014).
- **Morénové sedimenty:** Jsou druhem glaciálního tillu, proto křivky morénových sedimentů zahrnují jak jemné částice, tak hrubé balvany.
- **Svahová suť:** Křivky svahové suti mají strmý gradient s převahou hrubých částic. Minimální podíl jemných částic svědčí o mechanickém zvětrávání a gravitačních procesech jako dominantních zdrojích sedimentu (Highland & Bobrowsky, 2008).



Obrázek 6: Zrnitostní křivky typických sedimentů
 zdroj: (<https://aulizar.wordpress.com/2010/11/01/batuan-sedimen/>)

Obrázek č. 6 je grafickým znázorněním zrnitostních křivek pro různé typy sedimentů, kde mne zajímají především glaciální till (*glacial till*) a sedimenty suťových svahů (*scree*). Glaciální till má široce rozptýlenou zrnitost – jedná se špatně tříděné sedimenty. Zatímco u sedimentů suťových svahů (*scree*) je značná převaha hrubých frakcí.

3.3. Typické příklady jezer ilustrujících různé geologické podmínky

Lago de Marboré (Pyreneje): Vliv granitického podloží

Lago de Marboré, nacházející se v Pyrenejích, je charakteristické přítomností granitického podloží. Granitické horniny poskytují pevný a stabilní základ, avšak jsou náchylné ke zvětřování mrazem (Highland & Bobrowsky, 2008). Tento proces – opakovaného zamrznutí a rozmrazení vody v přirozených puklinách horniny – způsobuje vznik trhlin, které se mohou dále rozšiřovat vlivem sezónních změn teplot, což vede k uvolňování balvanů a případnému riziku skalních říčních v blízkosti jezera (Hambrey & Alean, 2004). Stabilita granitického podloží je relativně vysoká, avšak s postupujícím zvětřováním mohou vznikat nestability (Clarke et al., 2015).



Obrázek 7: Lago de Marboré
(zdroj: <https://www.casapirinea.com/pineta-ibon-de-marbore/>)

Gokyo Lakes (Himálaj): Vliv morénové hráze na stabilitu

Gokyo Lakes v Nepálu jsou soustavou ledovcových jezer obklopených morénovými hrázemi. Morénové hráze, složené z nesoudržných sedimentů a kamenů, jsou náchylné k erozi a průsakům. V roce 1985 došlo k významnému průvalu hráze Gokyo Lake III, což způsobilo povodňovou vlnu zasahující níže položené oblasti (Ives et al., 2010). Příklady z této oblasti ukazují, jak se morénové hráze mohou stát nestabilními vlivem klimatických změn a zvýšeného tání ledovců, což vede k nárůstu hladiny jezer a zvýšenému tlaku na hráze (Emmer & Vilímek, 2013). Tyto jezera jsou také ohrožena seismickou aktivitou v regionu, což může spustit průvaly a sesuvy půdy (Benn & Evans, 2014).



Obrázek 8: Third Lake (jedno z jezer Gokyo Lakes)
zdroj: (<https://photos.com/featured/gokyo-lake-third-lake-sagarmatha-feng-wei-photography.html>)

Lago Palcacocha (Andy): Rizika spojená se sedimentárním podložím

Lago Palcacocha v peruánských Andách je situováno na sedimentárním podloží, které má nižší stabilitu než tvrdé, krystalické horniny. Sedimentární horniny a jemné sedimenty, přenášené do jezera z okolních svahů, zvyšují riziko sesuvů a sedimentace v jezerní pánvi (Carey, 2005). Sedimentární podloží přispívá ke snížené stabilitě přirozené hráze jezera, a v případě intenzivních srážek či zvýšeného tání ledovce se může snadno destabilizovat (Emmer & Cochachin, 2013). Tato situace je riziková zejména při vysokých vodních stavech, kdy dochází k napětí ve svazích a riziku sesuvů nebo dokonce protržení hráze, jak se stalo v roce 1941, kdy průval jezera způsobil devastující povodeň v okolí Huarazu (Vilímek et al., 2015; Emmer et al., 2018).



Obrázek 9: Jezero Pacacocha
zdroj: (<https://www.andenglaciers.org/palcacocha-glof-bombas-tiempo-cordillera-blanca-1>)

4. Inženýrskogeologická rizika v okolí ledovcových jezer

Abych se mohla věnovat inženýrskogeologickým rizikům, musím si nejdřív specifikovat, co je vlastně inženýrská geologie.

Inženýrská geologie je vědní obor na pomezí geologie a stavebního inženýrství, který se zabývá aplikací geologických poznatků při plánování, návrhu a realizaci stavebních projektů. Tento obor poskytuje informace o vlastnostech horninového a půdního prostředí, které jsou klíčové pro bezpečnost a stabilitu staveb (Horák et al., 2005).

Pojem „riziko“ má své kořeny ve středověku, konkrétně v oblasti námořní dopravy – odvozuje se od italského slova „*risico*“, které označuje skalní útes, kterému se námořníci měli vyhnout, aby zajistili svou bezpečnost. Inženýrskogeologická rizika zahrnují procesy a události spojené s geologickými a geomorfologickými podmínkami, které mohou negativně ovlivnit bezpečnost (Rozsypal, 2008; ‘ČGS’, n.d.).

Z pohledu inženýrské geologie je – právě kvůli bezpečnosti staveb – velmi důležité definovat rizika tak, abychom byli schopni jim zcela předejít, nebo alespoň zabránit dalšímu opakování již vzniklých škod a katastrof.

4.1. Svahové pohyby

Svahové pohyby jsou procesy způsobené gravitací, při nichž se horniny a zeminy přesouvají dolů po svazích, často narušením rovnováhy sil (Highland & Bobrowsky, 2008). Rozdělují se podle různých kritérií, jako je způsob pohybu, materiál nebo rychlost. Existuje několik klasifikačních systémů, přičemž mezi asi nejznámější patří československá klasifikace podle Nemčoka, Paška a Rybáře (1974) a celosvětově rozšířená klasifikace Varnes (1978).










Kdybych měla shrnout rozdíly mezi klasifikacemi, tak Nemčok, Pašek a Rybář kladli důraz na příčinu pohybů (gravitace, voda, tektonika, eroze), zatímco Varnes se zaměřuje na mechanismus pohybu (pád, posuv, ploužení) a materiál.

4.1.1. Klasifikace svahových pohybů podle Nemčoka, Paška a Rybáře

Tato klasifikace je československého původu a zaměřuje se na geomechanické vlastnosti hornin a sedimentů, přičemž rozlišuje mechanismus pohybu a charakter prostředí (Nemčok et al., 1974):

1. Ploužení

Ploužení je termín, který se používá k popisu pomalého tečení hmoty – jedná o dlouhodobý, obvykle stabilní pohyb horninových hmot, který se pohybuje rychlostí v řádech milimetrů až centimetrů za rok. Pokud dojde k výraznému zrychlení tohoto procesu, dochází k přechodu z ploužení na sesouvání, stékání nebo řícení. Ploužení lze tedy chápat jako přípravnou fázi před těmito událostmi.


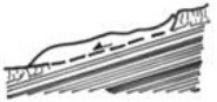



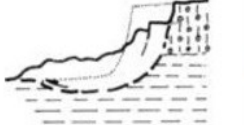


Zákl. sku-piny		Základní typy svahových pohybů	Příklady nejrozšířenějších typů svahových pohybů a jejich charakteristika	Příklad	Název výsledné svahové deformace	
plouzení	podpovrchové	tahové rozvolňování	rozvolňování skalního svahu vznikem puklin, které lemují tvary a dna erozního údolí		narušené svahy napětím	rozvolněné svahy
			rozvolňování svahu otevíráním tahových trhlin v jeho horní části		narušené svahy tahovými trhlinami	
		gravitační roztrhání	roztrhání vysokých horských masivů s hrástovými poklesy jejich svahů a roztrháním jejich hřebenů		rozpadlé svahy, potrháné svahy s roztrhanými hřebeny	
		gravitační shrnutí (zvrásnění)	shrnutí vysokých horských masivů zvrásněním jejich vrstev a se stupňovitými poklesy		shrnuté svahy se zohýbanými vrstvami	
			shrnování vrstev podél okrajů pánví		gravitační vrásy	
	vytláčení	vytláčení málo únosných a měkkých hornin na dně údolí		údolní antiklinály, vytláčení vrstev pod dnem údolí (bulging)		
		rotační vytláčení plastického podloží při blokových pohybech		bloková pootočení, bloková pole, cambering		
		laterální vytláčení při blokových pohybech po předurčené ploše		blokové posuny, blokové rozpadliny, bloková pole		
povrchové	plouzení	dlouhodobé plazivé přetváření povrchových vrstev svahů v zóně vlivu sezónních klimatických změn		slézání suti a svahových hlín, povrchové ohýbání vrstev, vyvlečení a hákování vrstev, kamenná moře, kamenné ledovce		

Tabulka 1: Klasifikace plouzení podle Nemčok et al. (1974) a Malgot et al. (1992)

Zdroj: (http://geologie.vsb.cz/svadeb/Text/2_klasifikace.htm)

2. Sesouvání

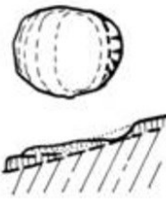
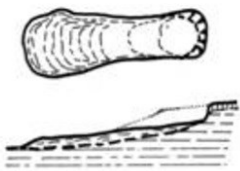
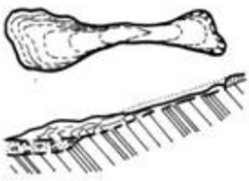
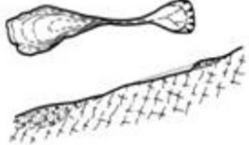
Sesouvání je relativně rychlý a krátkodobý klouzavý pohyb horninových hmot, ke kterému dochází na svahu podél jedné nebo více smykových ploch. Tento proces se projevuje formou známou jako „sesuv, přičemž charakteristickým rysem je, že část hmoty se nasune na původní terén v předpolí. Rychlost sesouvání je odhadována až na jeden metr za den.

Zákl. typy		Příklady nejrozšířenějších typů svahových pohybů a jejich charakteristika	Příklad	Název výsledné svahové deformace
sesouvání	klouzání (smýkání)	klouzání zemin podél rotační smykové plochy		rotační sesuvy, sesuvy podél rotační smykové plochy, insekventní sesuvy
		klouzání zemin podél rovinné smykové plochy		planární sesuvy, sesuvy podél rovinné smykové plochy, konsekventní sesuvy, skalní sesuvy po předurčené smykové ploše
		klouzání skalních hornin podél rovinné smykové plochy		sklouzávání skalních hornin
		klouzání podél složené, zakřivené a rovinné smykové plochy		rotačně-planární sesuvy sesuvy podél složené smykové plochy
	vytláčení	klouzání po převážně horizontální nebo mírně ukloněné smykové ploše, často spojované s vytlačáním vrstev na úpatí		laterální sesuvy translační sesuvy laterální sesuvy s vytlačáním
		sesouvání podél zakřivené smykové plochy v důsledku vytlačení méně únosných podkladových zemin		sesuvy v důsledku vytlačení
	prosedání	sesunutí v důsledku náhlého rozrušení původní struktury vrstvy prachovitých (sprašových) a citlivých disperzních zemin převlhčením, vyluhováním nebo seizmickými otřesy		sesuvy při prosedání nebo vyluhování
	vyplavování	sesunutí v důsledku porušení struktury vrstvy stejnozrnných písčito-prachovitých a písčitých zemin při hydrodynamickém působení podzemních vod		sufózní sesuvy sesuvy hydrodynamického vyplavování

Tabulka 2: Klasifikace sesouvání podle Nemčok et al. (1974) a Malgot et al. (1992)
Zdroj: (http://geologie.vsb.cz/svadef/Text/2_klasifikace.htm)

3. Stékání






Stékání představuje rychlý a krátkodobý pohyb horninových materiálů ve viskózním stavu. V rámci tohoto procesu se podstatná část hmoty uvolní z odlučné jámy a přemístí se po povrchu, přičemž stékající materiály jsou jasně odděleny od neporušeného podloží. Na rozdíl od ploužení, se stékání vyznačuje „rychlým“ tokem, jehož rychlost může dosahovat od několika metrů až po kilometry za hodinu. Výsledným projevem tohoto pohybu je „proud“. Pokud však podíl vody v stékající směsi převyšuje podíl horninových materiálů, pak tento proces již nelze považovat za svahový pohyb.

Zákl. typy	Příklady nejrozšířenějších typů svahových pohybů a jejich charakteristika	Příklad	Název svahových poruch
stékání	stékání povrchových částí pokravných zemin při jejich velkém převlhčení a nasycení v období intenzivních srážek nebo jarního rozmrzání a tání		strže
	stékání svahových neulehlých písčito-prachovitých zemin a mořských a jezerních disperzních zemin při náhlém rozrušení jejich struktury spojené s jejich ztekucením		zemní proudy v citlivých jílech, bahenní proudy, subakvální proudy
	stékání svahových jílovitopísčitých a hlinitých zemin při jejich výrazném přesycení povrchovými i podzemními vodami		zemní proudy, rozbahněné proudy
	stékání hlinitých a kamenitohlinitých svahových uloženin působením přívalových vod		hlinité přívalové proudy, kamenitohlinité přívalové proudy - mury

Tabulka 3: Klasifikace stékání podle Nemčok et al. (1974) a Malgot et al. (1992)
Zdroj: (http://geologie.vsb.cz/svadef/Text/2_klasifikace.htm)

4. Řízení

Řízení je náhlý a krátkodobý pohyb horninových hmot po strmých svazích, kdy postižené materiály na čas ztrácí kontakt s podložím – projevuje se tedy volný pád. Vzhledem k prostorovým rozměrům zříceného masívu je vzdálenost, na kterou se hmoty přesunou, několikanásobně větší. Rychlost řízení může dosahovat rychlosti až metry za sekundu.

Zákl. typy		Příklady nejrozšířenějších typů svahových pohybů a jejich charakteristika	Příklad	Název výsledné svahové deformace
řícení	sesypávání	přemísťování drobných úlomků hornin kutálením, valením a poskakováním		sesypy vydrolení
	opadávání	náhlé přemísťování úlomků hornin volným pádem (v počáteční části dráhy padajících mas)		opadové kužely, suťové kužely, haldy, padání kamenů
	odvalování překlopením	náhlé přemísťování bloků a stěn skalních hornin především volným pádem		odvalová řícení překlopením, skalní řícení, skalní odtržení
		náhlé přemísťování zemin především volným pádem		odvaly zemních stěn
	odvalování sklouznutím	náhlé přemísťování skalních bloků, při kterém se kombinuje klouzání po předurčené ploše s volným pádem		planární skalní řícení skalní řícení kombinované se sklouznutím odvalové řícení sklouznutím

Tabulka 4: Klasifikace řícení podle Nemčok et al. (1974) a Malgot et al. (1992)
Zdroj: (http://geologie.vsb.cz/svadeb/Text/2_klasifikace.htm)

4.1.2. Klasifikace svahových pohybů podle Varnese

Americká klasifikace, která se zaměřuje na mechanismus pohybu (forma pohybu) a typ materiálu. Jde o systém běžně používaný v mezinárodním měřítku (Hungar et al., 2014):

1. Pád (*Fall*) – rychlý volný pohyb hornin nebo zemin z výšky
 - Skalní pád (*Rockfall*) – pád jednotlivých kamenů nebo bloků.
 - Sutinový pád (*Debris fall*) – pád nasycených sutin.
 - Příklad: Pád skalních bloků z alpských stěn.
2. Odvalování a řícení (*Topple*) – převrácení bloků kolem osy nebo zhroucení skalních struktur.
 - Skalní převrácení (*Rock topple*)
 - Sutinové převrácení (*Debris topple*)
 - Příklad: Převrácení skalního pilíře kvůli erozi spodní části.
3. Posuv (*Slide*) – pohyb materiálu podél smykové plochy
 - Rotační sesuv (*Rotational slide*) – kruhová smyková plocha
 - Translační sesuv (*Translational slide*) – rovinná smyková plocha
 - Příklad: Sesuvy na březích přehrad.

4. Ploužení (*Flow*) – pomalý až rychlý pohyb plastického materiálu (připomínající tekutinu)

- Bahnotok (*Mudflow*) – jemnozrný materiál, rychlý pohyb
- *Debris flow* – hrubozrný materiál.
 - Příklad: Tok bahna po přivalových deštích.

5. Roztažení (*Spread*) – rozpad materiálu na svahu v důsledku deformace podloží

- Tektonické roztažení (na poruchách)
- Roztažení vlivem vody (zvedání nasycených vrstev)
 - Příklad: Rozpad sedimentů při přetížení srážkami.

6. Kombinované pohyby – spojení různých mechanismů (např. pád následovaný tokem).

- Příklad: Kolaps skalního bloku následovaný proudem štěrku.
- Rozdělení podle materiálu: Horniny (*Rock*), Sutiny (*Debris*), Jemnozrné sedimenty (*Earth*).

Obě klasifikace se vzájemně doplňují a umožňují komplexní analýzu svahových pohybů v různých geologických prostředích.

4.1.3. Prostorové rozložení svahových pohybů

Rozdělení svahových pohybů podle prostorového umístění pomáhá lépe vysvětlit dynamiku rizik ledovcového prostředí, proto následuje přehled svahových pohybů pro každé z těchto míst – pro snazší orientaci místa řadím od nejvyššího k nejnižšímu.

4.1.3.1. Ledovce

Ledovce představují dynamickou část horského prostředí, kde dochází k různým typům svahových pohybů, zejména vlivem tání, gravitace a interakcí s okolními sedimenty a horninami. Pády v oblasti ledovců zahrnují uvolnění ledových bloků nebo ledových věží, které se zřítí do prostoru pod ledovcem. Tyto pády jsou typické pro příkré okraje ledovců, kde je led oslaben trhlinami a procesy tání. Nejčastější příčinou je termální tání, které narušuje mechanickou soudržnost ledu, dále gravitační působení a tlak hmoty ledu (Deline et al., 2015). Mrazové zvětrávání na okrajích ledovců může také přispět k jejich destabilizaci (Highland & Bobrowsky, 2008). Pády ledových bloků mohou iniciovat tlakové vlny v jezerech, což může destabilizovat jezerní hráze. Z hlediska inženýrskogeologického je nutné monitorovat ledovcová čela kvůli riziku náhlého odtržení větších bloků. Tání ledovců zároveň vede k pohybu směsi sedimentů, vody a ledu, která se může chovat jako tekutina. Tyto toky jsou běžné na čelech tříštících se ledovců. Intenzivní sezónní tání, akumulace vody pod ledovcem a náhlé průlomy subglaciálních jezer tyto pohyby zesilují (Richardson & Reynolds, 2000; Deline et al., 2015). Tyto proudy přenášejí sedimenty a vytvářejí erozní struktury podél svahů. Zároveň mohou přispět k zvyšování jezerní hladiny, čímž se zvyšuje tlak na jezerní hráze (Highland & Bobrowsky, 2008). Kombinace pádů a následného toku sedimentů je běžná při náhlém zřícení větší části ledovce. Kolaps čela

ledovce vlivem oslabení strukturální integrity může vést k devastujícím povodním a přetížení okolních svahů sedimenty (Deline et al., 2015).

4.1.3.2. Skalní svahy

Horní skalní svahy obklopující ledovcové oblasti jsou vystaveny extrémním podmínkám, jako jsou mrazová zvětrávání, tektonická aktivita a eroze. Pády hornin jsou typické na příkrých svazích, kde mrazové zvětrávání narušuje skalní povrchy (Highland & Bobrowsky, 2008). Opakované zamrzání a tání vody v puklinách skal oslabuje horninovou soudržnost, zatímco seismická aktivita může spustit náhlé uvolnění bloků (Crosta et al., 2014). Pád hornin může způsobit sekundární destabilizaci níže položených sedimentů nebo jezerních hrází (Highland & Bobrowsky, 2008). Převrácení skalních bloků je časté na svazích, kde eroze nebo zvětrávání oslabují jejich základnu. Tektonické pohyby, seismická aktivita a oslabení spodní části skal přispívají k těmto procesům (Highland & Bobrowsky, 2008; Crosta et al., 2014). Lokální kolapsy skal mohou zasáhnout jezerní hráze nebo spustit tlakové vlny v jezerech (Deline et al., 2015). Na horních svazích se také objevují rotační i translační sesuvy, často v kombinaci se sekundárními procesy, jako je ploužení. Intenzivní srážky, eroze spodních částí svahů nebo zemětřesení jsou hlavními příčinami těchto pohybů (Dahal & Hasegawa, 2008). Sesuvy mohou způsobit přehrazení vodních toků a vznik nových jezerních nádrží (Highland & Bobrowsky, 2008).

4.1.3.3. Jezerní svahy

Svahy přímo obklopující ledovcová jezera jsou silně ovlivněny vodní hladinou a dynamikou jezera. Pády sedimentů a skal podél břehů jezera jsou běžné, často spojené s vodní erozí. Destabilizace břehů v důsledku stoupající hladiny jezera nebo podmáčení sedimentů přispívá k těmto jevům (Dahal & Hasegawa, 2008). Tyto procesy zároveň přispívají k zanášení jezer a mohou ovlivnit jejich retenční kapacitu (Richardson & Reynolds, 2000). Rotační i translační sesuvy jsou běžné na nasycených svazích ovlivněných hladinou jezera. Snížení smykové pevnosti sedimentů vlivem podmáčení a zvýšeného hydrostatického tlaku vede k těmto procesům (Deline et al., 2015). Tyto pohyby mohou způsobit náhlé vlny v jezerech a destabilizaci jezerní hráze (Highland & Bobrowsky, 2008).

4.1.3.4. Jezerní hráz

Jezerní hráze, zejména ty tvořené morénovými sedimenty, představují citlivou část ledovcových jezer, kde dochází k řadě svahových pohybů. Pády materiálů z hráze mohou být způsobeny buď erozí základny hráze, nebo vnitřní nestabilitou sedimentů, která je umocněna tlakem vody (Richardson & Reynolds, 2000). Tyto pády často vedou ke snížení stability hráze a mohou iniciovat její náhlý průlom (Highland & Bobrowsky, 2008). Ploužení sedimentů je běžné na hrázích s nesoudržnými materiály. Tato pomalá deformace je důsledkem nasycení hráze vodou a zvýšeného hydrostatického tlaku. Přívalové deště nebo tání ledovců mohou tento proces urychlit a zvýšit pravděpodobnost selhání hráze

(Deline et al., 2015). Kromě toho je běžná eroze základny hráze způsobená odtékající vodou, tzv. "scouring," která dále oslabuje její stabilitu (Richardson & Reynolds, 2000). Kombinace posuvů a eroze může vést k náhlým povodním způsobeným průlomem hráze, což bylo zdokumentováno například u jezera Dig Tsho v Nepálu (Dahal & Hasegawa, 2008). Z hlediska inženýrského monitorování je klíčové sledovat filtrační stabilitu hráze a provádět pravidelná odvodňovací opatření.

4.1.3.5. Údolí pod jezery

Údolí pod jezerem Údolí pod ledovcovými jezery jsou často místem sekundárních svahových pohybů, které následují po průlomech hrází nebo masivních povodních. Pády sedimentů a hornin ze svahů v údolí jsou běžné v důsledku přetížení způsobeného povodňovými vlnami. Tyto procesy mohou destabilizovat okolní svahy a iniciovat další sesuvy (Emmer et al., 2016). Ploužení sedimentů v údolích je časté, zejména v oblastech, kde dochází k saturaci půdy povodňovou vodou. Nasycené sedimenty ztrácejí smykovou pevnost a pohybují se dolů po svazích, což přispívá k erozi dna údolí a přeměně krajiny (Highland & Bobrowsky, 2008). Kombinované pohyby, jako jsou sesuvy následované proudy bahna, mohou mít devastující dopad na infrastrukturu a osídlení v údolí. Povodně způsobené průlomem hráze často přenášejí velké množství sedimentů, což vede k zanášení toků a tvorbě nových jezerních nádrží. Příkladem je případ jezera Palcacocha v Peru, kde následky povodně zasáhly rozsáhlé oblasti v údolí (Deline et al., 2015).



Obrázek 10: Schematický náčrt řetězce impulsu pohybu hmoty u ledovcových jezer
Zdroj: (Allen et al., 2017)

Vliv deště na svahové pohyby

Intenzivní srážky způsobují nasycení sedimentů a snižují smykovou pevnost, což vede k sesuvům. V oblastech Himálaje byly analyzovány prahové hodnoty srážek, při jejichž překročení dochází k masivním pohybům (Dahal & Hasegawa, 2008).

Vliv tektoniky a seismiky na horninové podloží

Tektonická aktivita a zemětřesení mají zásadní vliv na stabilitu okolí ledovcových jezer. V oblastech s častými seismickými otřesy dochází k destabilizaci svahů a morénových hrází, což může spustit sesuvy půdy nebo kolapsy hrází. Například u jezera č. 513 v peruánských Andách, jehož hráz je tvořena morénovými sedimenty, je vysoké riziko destabilizace vlivem zemětřesení (Klimeš et al., 2014).

4.2. Hydraulické porušení a eroze

Hydraulické porušení a eroze představují významná inženýrskogeologická rizika, která ohrožují stabilitu ledovcových jezer a jejich okolí. Oba procesy jsou úzce spojeny s pohybem vody a jejím vlivem na sedimenty a horninové masivy.

- Hydraulické porušení: Tento proces označuje destabilizaci materiálu hráze nebo svahů vlivem působení vody, a to buď jejím statickým tlakem, nebo prouděním (Richardson & Reynolds, 2000; Hala & Říha, 2016).
 - Přetlakové porušení: Vzniká při překročení únosnosti hráze vlivem vysoké hladiny vody nebo tlakových vln (Richardson & Reynolds, 2000).
 - Porušení filtrační stabilitou: Způsobené migrací jemných částic v nesoudržných materiálech hráze, což vede ke ztrátě stability (Hala & Říha, 2016).
- Eroze: Označuje proces odstraňování materiálu proudící vodou (Richardson & Reynolds, 2000).
 - Povrchová eroze: Probíhá na povrchu svahů, kde proudící voda odnáší jemné částice (Hala & Říha, 2016)
 - Hlubková eroze: Dochází k vymílání základny svahů nebo hráze, tzv. scouring (Richardson & Reynolds, 2000).

4.2.1. Prostorové rozložení hydraulického porušení a eroze

Prostorového umístění pomáhá lépe vysvětlit dynamiku rizik ledovcového prostředí, proto následuje přehled míst, která mají vliv na vznik hydraulického porušení a erozi.

4.2.1.1. Ledovec

Ledovce přispívají k hydraulickému porušení a erozi převážně skrze tání, které generuje velké objemy vody – tyto toky mohou způsobit povrchovou erozi morénových hrází nebo i přetížení svahů (Deline et al., 2015).

4.2.1.2. Skalní svahy

Skalní svahy jsou méně náchylné k erozi, avšak mohou být ovlivněny hlubkovou erozí v místech, kde voda proudí v blízkosti skalních masivů (Richardson & Reynolds, 2000). Tento proces může vést k odlamování skalních bloků, což zvyšuje riziko tlakových vln v jezerech (Deline et al., 2015).

4.2.1.3. Jezerní svahy

Na svazích obklopujících jezera dochází k povrchové erozi v důsledku proudění vody po svazích během intenzivních srážek nebo při sezónním tání (Hala & Říha, 2016). Hlubková eroze zde může destabilizovat břehy jezer, což zvyšuje riziko sesuvů a následných vln v jezerech (Richardson & Reynolds, 2000). Zajištění svahů proti erozi zahrnuje zpevnění břehů geotextiliemi nebo výsadbou vegetace (Deline et al., 2015).

4.2.1.4. Jezerní hráz

Hráze ledovcových jezer, tvořené často nesoudržnými morénovými sedimenty, jsou zvláště náchylné k hydraulickému porušení a erozi (Hala & Říha, 2016). *Scouring* – tedy podmílání základny hráze – je způsoben proudící vodou při odtoku z jezera nebo při tlakových vlnách po pádu ledových bloků (Richardson & Reynolds, 2000). Kromě toho je časté porušení filtrační stabilitou, kdy dochází k migraci jemných částic uvnitř hráze. Tento proces byl zdokumentován například u jezera Dig Tsho v Nepálu, kde průlom hráze vedl k masivní povodni (Dahal & Hasegawa, 2008). Opatření zahrnuje stabilizaci hrází pomocí vegetačního krytu nebo odvodňovacích systémů (Richardson & Reynolds, 2000).

4.2.1.5. Údolí pod jezerem

V údolích pod jezery se hydraulické porušení projevuje formou povodní po průlomu hráz. Tyto povodně často způsobují rozsáhlou hloubkovou erozi a destabilizaci svahů, což bylo dokumentováno například u jezera Palcacocha v Peru (Emmer et al., 2016). Zajištění údolí proti těmto rizikům zahrnuje instalaci varovných systémů a budování protipovodňových hrází (Deline et al., 2015).

4.3. Příčiny a faktory svahových pohybů

Příčinou svahových pohybů je mnoho aspektů, neboť na svahy působí mnoho rizikových faktorů, které mohou narušit svah. Analýza těchto rizik představuje klíčový nástroj pro identifikaci a pochopení hlavních příčin svahových pohybů v horských oblastech ledovcových jezer.

Hydrologická rizika

Průsaky a potenciální kolapsy morénových hrází představují jedno z největších rizik. Hráze tvořené nesoudržnými sedimenty, jako jsou písky, štěrky a jemnozrnné sedimenty, vykazují variabilní pórovitost a propustnost, což ovlivňuje jejich odolnost vůči průsakům (Richardson & Reynolds, 2000). Tyto vlastnosti se stávají kritickými zejména v obdobích intenzivních srážek nebo náhlého tání ledovců, kdy dochází ke zvýšení objemu vody v jezeře. Jemnozrnné sedimenty jsou navíc náchylné k rozplavování, což významně zvyšuje riziko narušení stability hráze (Emmer & Cochachin, 2013). Hydrologické modely ukazují, že riziko protržení hráze se zvyšuje zejména u jezer, kde hráz není dostatečně zpevněná vegetací nebo ledovcovým ledem. Například protržení jezera Dig Tsho v Nepálu v roce 1985 bylo způsobeno náhlým přítokem vody po odtržení části visícího ledovce, což vedlo k rychlé erozi morénové hráze (Ives et al., 2010).

Seismická a vulkanická rizika

Vulkanická činnost a zemětřesení značně ovlivňují stabilitu svahů. V seismicky aktivních oblastech, jako jsou Himaláje nebo Andy, představují významnou hrozbu. Tektonická aktivita může destabilizovat hráže přímo, narušením jejich struktury, nebo

nepřímo, například uvolněním materiálu na svazích, který následně padá do jezera. Tento proces může vytvořit tlakové vlny, jež mohou způsobit přetečení hráze nebo její protržení (Schuster, 2004). Příkladem je protržení jezera Langmoche v Nepálu, kde zemětřesení vyvolalo svahový sesuv do jezera, což vedlo k masivní povodni v roce 1981 (Bajracharya & Mool, 2009). Riziko seismických událostí je obzvláště vysoké u jezer, jejichž hráze nejsou stabilizovány skalními fragmenty a jsou tvořeny převážně jemnozrnnými sedimenty.

Klimatická rizika

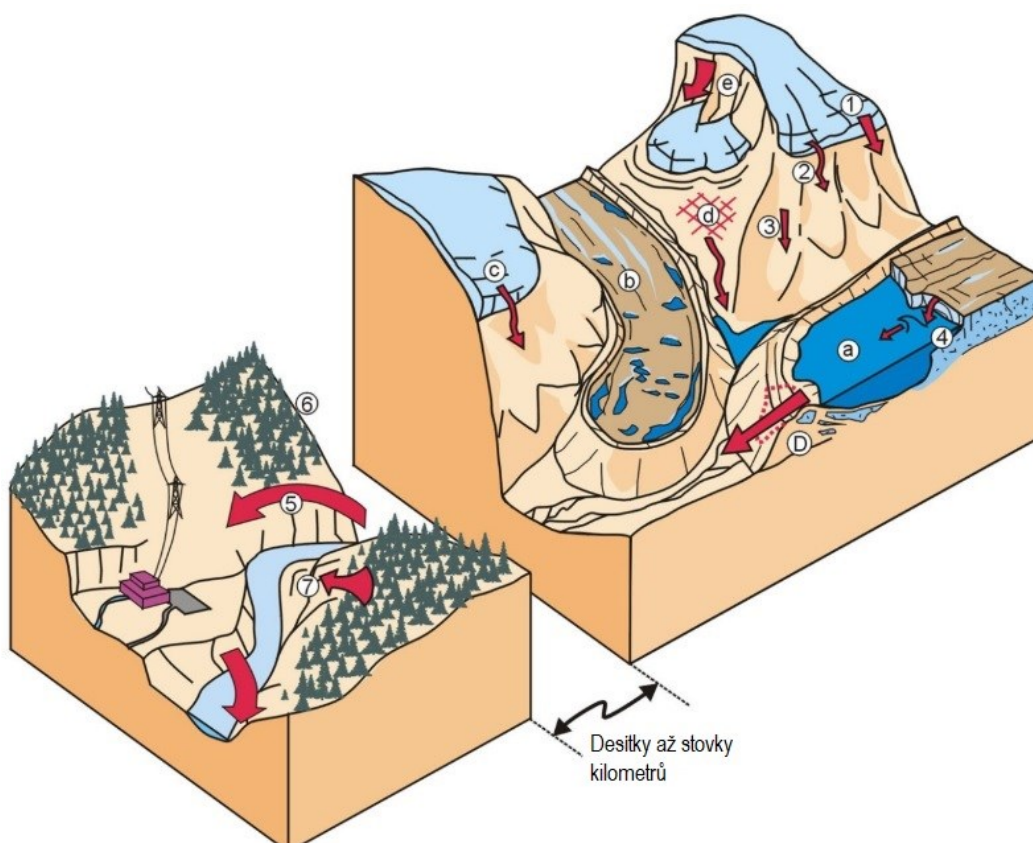
Klimatické změny zrychlují proces tání ledovců, což zvyšuje objem vody v jezerech a tlak na morénové hráze. Růst teplot navíc zvyšuje frekvenci extrémních srážek, které mohou přispět k přetečení jezera nebo erozi hrází. Modely ukazují, že nízké a nestabilní hráze tvořené volnými sedimenty jsou nejvíce zranitelné (Richardson & Reynolds, 2000). Například jezero Palcacocha v Peru zaznamenalo výrazné zvýšení hladiny v důsledku klimatických změn, což vedlo k přijetí mitigujících opatření, jako je odvodnění jezera a zpevnění hráze (Klimeš et al., 2016).

Komplexní analýza rizik

Pro detailní hodnocení rizik je nezbytné propojit fyzikální, hydrologické a klimatické faktory. Například analýza rizik jezera Safuna v Peru zahrnovala modelování sesuvů způsobených degradací permafrostu a hodnocení pravděpodobnosti destabilizace hrází vlivem náhlých změn teplot a extrémních srážek (Klimeš et al., 2021). Další přístupy zahrnují simulace povodní pomocí modelů, jako je HEC-RAS, které umožňují předpovědět dynamiku průtoku vody a rozsah zaplavení při protržení hrází. Takové simulace byly použity například pro hodnocení rizik v oblasti Langtang v Nepálu, kde byla zohledněna kombinace seismických a klimatických faktorů (Klimeš et al., 2014). Příčiny a rizikové faktory se se v tomto ohledu značně překrývají, protože to, co původně bylo pouze rizikem, se často stane příčinou svahového pohybu.

Hlavní nebezpečí spojená s ledovci ve vysokohorských oblastech

- (a) ledovcová jezera přehrazená nestabilními morénovými komplexy (D)
- (b) Nízkoúhlé ledovcové jazyky pokryté sutí na prahu vzniku ledovcových jezer. Bylo pozorováno, že taková jezera vznikají během několika desetiletí.
- (c) Ledové laviny dopadající přímo nebo transformující se v suťové proudy. Přímé dopady ledových lavin vyvolávají největší obavy v oblastech, kde potenciální cíle leží v okruhu několika kilometrů od ledovců.
- (d) Selhání nasycených ledovcových sedimentů, které se stávají suťovými proudy.
- (e) Katastrofické skalní laviny, nejničivější typ sesuvů, vyvolané zemětřesením nebo táním věčně zmrzlé půdy v čelech ledovců.



Obrázek 11: Schéma nebezpečí vysokohorských oblastí
Zdroj: (Reynolds Geo-Sciences, 2003)

4.3.1. „Spouštěče“ svahových pohybů

Podle Wiczorka je hlavní „spouštěč“ sesuvu označován termínem „*trigger*“. Svahové pohyby mohou být způsobeny různými rizikovými faktory/příčinami, ale vždy je nakonec přítomen jeden konkrétní „spouštěč“, který svahy uvedl do pohybu. Wiczorek definuje tento podnět jako intenzivní srážky, silné sněžení, změny v hladině podzemní vody, sopečnou činnost nebo zemětřesení, neboť všechny tyto jevy vedou k zvýšenému napětí nebo snížené pevnosti hornin v daném svahu, což může vyústit ve svahové pohyby (Wiczorek & Jäger, 1996; Honzejková, 2019). „Spouštěč“ svahových pohybů tedy přímo spadá do kategorie příčin a rizikových faktorů svahových pohybů, ovšem spouštěč je tzv. „poslední třešnička na dortu“, jež se stane posledním rizikovým faktorem, než se svah dá do pohybu.

Spouštěče jako „Intenzivní deště“, „Rychlé tání sněhu a ledu“ a „Změny v hladině podzemní vody“ tak spadají do kategorie hydrologické příčiny, protože poslední rizikový faktor svahového pohybu úzce souvisel s vodou. Rychlá infiltrace srážkové vody může vést k saturaci svahů, čímž se zvyšují pórové tlaky. Během tání sněhu a ledu dochází k vyplnění puklin a prostor v horninovém masivu, což rovněž zvyšuje pórové tlaky – stabilita svahu se tedy snižuje a může dojít k sesuvům. Náhlé změny v hladině podzemní vody, ať už rychlý pokles nebo vzestup, mohou rovněž vyvolat sesuvy půdy, protože opět narušuje pórové tlaky (Wiczorek & Jäger, 1996), které blíže vysvětlím v následující podkapitole.

Spouštěč „Rychlé tání sněhu“ ovšem spadá i do kategorie klimatických příčin, protože obvykle souvisí i s náhlým oteplením. Rovněž spouštěč „Změny v hladině podzemní vody“ může spadat do kategorie klimatických příčin, pokud změna hladiny úzce souvisela s klimatickou změnou nebo obdobím dešťů.

Spouštěče svahových pohybů jako „Sopečná činnost“ a „Zemětřesení“ patří do kategorie Seismických a vulkanických rizik. Vulkanické erupce přispívají k usazování sopečných popílků na svazích, což zrychluje erozi. Při deštích se pak vytvářejí bahnité proudy, dochází k hromadění úlomků a sedimentů, a to následně snižuje stabilitu svahu. Zemětřesení způsobují otřesy země, které přispívají k sesuvům v mnoha různých oblastech – zvláště citlivé jsou pak oblasti, kde již k sesuvům dříve došlo (Richardson & Reynolds, 2000).

Spouštěčem svahových pohybů samozřejmě může být i činnost člověka. Neuvážené zásahy do přírodního prostředí mohou značně ovlivnit stabilitu svahů a následně způsobit katastrofu. Tyto antropogenní faktory spadají do všech rizikových kategorií, protože činnost člověka může mít dopad z mnoha různých hledisek. Svahové pohyby mohou nastat v důsledku úprav sklonu svahu, zavlažování, čerpání vody z jezer a nádrží, odlesňování nebo i uměle vyvolanými vibracemi spojené s lidskou činností (Honzejková, 2019).

4.3.2. Změny v objemu vody – vliv na stav a stabilitu jezer

Klimatické změny zásadně ovlivňují stabilitu vysokohorských ledovcových jezer. Zvyšující se teploty způsobují zrychlené tání ledovců, což vede k postupnému nárůstu objemu vody v jezerech. Tento proces má zásadní dopady na mechanickou stabilitu přirozených morénových hrází i okolních svahů, a tím přispívá ke zvýšení rizika katastrofických událostí, jako jsou GLOFs (Emmer & Vilímek, 2014).

Zrychlené tání a nárůst objemu vody

Tání ledovců zvyšuje přítok vody do jezer, což vede k postupnému zvyšování hladiny. Vyšší hladina vody působí zvýšeným hydrostatickým tlakem na hráz i okolní svahy, což může destabilizovat přirozené bariéry tvořené nesoudržnými sedimenty. V případech, kdy je objem vody výrazně vyšší než retenční kapacita hráze, může dojít k jejímu přetečení nebo porušení. Příkladem je jezero Gokyo v Nepálu, kde sezónní tání způsobuje cyklické nárůsty objemu vody (Ives et al., 2010). Tyto změny zvyšují tlak na morénové hráže, zvláště během období intenzivních srážek, kdy je riziko přetížení nejvyšší. Podobné procesy byly dokumentovány i u jezera Palcacocha v Andách, kde zvýšený objem vody přispěl k destabilizaci hráze a následné povodni v roce 1941 (Emmer et al., 2018).

Pórový tlak a jeho vliv na stabilitu

Pórový tlak je tlak vody v pórech zeminy, který významně ovlivňuje efektivní napětí a tím i stabilitu sedimentů tvořících hráz a okolní svahy (Hrubešová, 2012). Se zvýšením hladiny

vody v jezeře dochází ke zvýšení pórového tlaku uvnitř hráze a v jejím okolí. Podle Hrušešové tento proces může vést ke snížení smykové pevnosti sedimentů a zvýšení rizika jejich deformace nebo porušení. V dobře propustných zeminách, jako je štěrk, se pórové tlaky rychle rozptýlí, ovšem v málo propustných zeminách, jako je jíl, voda zůstává uvězněna v pórech, což způsobuje dlouhodobé zvýšení pórového tlaku. Tento efekt může být příčinou sesuvů nebo kolapsů hráze, pokud hydrostatický tlak překročí mez pevnosti sedimentů.

Dopad na stabilitu svahů a hrází

Zvýšení hladiny vody ovlivňuje stabilitu svahů i hrází několika způsoby:

- Erozní procesy: Vyšší hladina vody zvyšuje tlak na morénové sedimenty, čímž zvyšuje riziko eroze a podmílání základny hráze. Tento proces oslabuje vnitřní strukturu hráze a může vést k jejímu postupnému kolapsu.
- Nasycení sedimentů: Nasycené sedimenty ztrácejí smykovou pevnost, což zvyšuje riziko svahových pohybů. V extrémních případech může dojít k náhlému sesuvu, který může hráz přetížit nebo zcela narušit.
- Tlakové vlny: Náhlé události, jako jsou sesuvy nebo pády ledových bloků do jezera, mohou vyvolat tlakové vlny, které přetížjí hráz a způsobí její proražení. Například u jezera Sarez v Tádžikistánu představuje kombinace nárůstu objemu vody a seismické aktivity dlouhodobé riziko destabilizace hráze (Schuster, 2004).

Změny v objemu vody v ledovcových jezerech představují kritický faktor ovlivňující jejich stabilitu. Zvýšený pórový tlak, nasycení sedimentů a erozní procesy spolu vytvářejí složitý systém vzájemně se ovlivňujících rizik. Monitorování těchto parametrů, například pomocí piezometrů, a aplikace preventivních opatření, jako je stabilizace hrází nebo regulace hladiny vody, jsou klíčové pro minimalizaci rizik spojených s těmito jevy, proto je blíže vysvětlím v následující kapitole.

5. Technické a inženýrské přístupy

5.1. Metody sledování jezer a jejich stability

Monitorování ledovcových jezer pomocí moderních technologií je klíčové pro předcházení rizikům a identifikaci potenciálních nebezpečí (Caduff et al., 2015). Vysokohorské oblasti často vyžadují specializované přístupy, které zohledňují obtížně přístupné terény a dynamické podmínky (Lucas et al., 2017). Tato kapitola detailně popisuje technologie a metody používané při sledování stability ledovcových jezer.

5.1.1. Satelitní a dálkové metody

Globální navigační satelitní systémy (GNSS) využívají satelitní signály k přesnému určování polohy na Zemi. Pro monitorování stability ledovcových jezer se GNSS senzory umísťují na strategické body v okolí jezer nebo nestabilních svahů (Carlà et al., 2019). Tyto technologie byly využity například pro sledování jezer v Himalájích, kde se objevují významné změny velikosti jezer vlivem zrychleného tání ledovců (Bajracharya & Mool, 2009). Satelitní snímky jsou zvláště užitečné v nepřístupných oblastech, kde je pravidelný fyzický monitoring nákladný a logisticky náročný. GNSS senzory zaznamenávají změny polohy vůči satelitům na oběžné dráze a tyto informace jsou pak využívány k detekci posunů povrchu, které mohou naznačovat riziko sesuvů nebo destabilizace hrází (Carlà et al., 2019; 'Satelitní Systémy', n.d.).

Výhody: Poskytuje kontinuální data v reálném čase. Vysoká přesnost měření na milimetrové úrovni. Možnost dlouhodobého sledování s minimálními požadavky na údržbu.

Nevýhody: Vyžaduje otevřený prostor bez rušení signálu. Citlivost na atmosférické podmínky a interferenci.

Metoda InSAR

InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) je technologie, která využívá elektromagnetické vlny k mapování povrchu země. Principem je porovnání radarových snímků pořízených z vesmírných satelitů v různých časech. Rozdíly ve fázi signálů pak odhalují deformace povrchu s milimetrovou přesností (Caduff et al., 2015). InSAR je ideální pro monitorování rozsáhlých oblastí, jako jsou ledovcová jezera (Lucas et al., 2017). Radarové signály jsou vysílány satelity a odrazem od povrchu se vracejí zpět – změny v časové synchronizaci signálů z různých snímků odhalují změny v nadmořské výšce nebo deformace (Caduff et al., 2015).

Výhody: Široké prostorové pokrytí: Vhodné pro rozsáhlé oblasti, které je těžké fyzicky monitorovat. Vysoká přesnost: Změří deformace na úrovni milimetrů. Dlouhodobé sledování: Možnost získávat data z historických snímků a analyzovat dlouhodobé trendy.

Nevýhody: Omezená časová frekvence: Síť satelitů nezajišťuje neustálý monitoring. Citlivost na podmínky povrchu: Hustá vegetace nebo extrémní terén mohou snižovat kvalitu dat.

Dronové technologie

Bezpilotní letadla (drony) se stala moderním nástrojem pro monitorování obtížně přístupných oblastí. Drony vybavené kamerami s vysokým rozlišením nebo lidarovými senzory umožňují detailní mapování morénových hrází a detekci změn povrchu (Emmer et al., 2018). Drony shromažďují data, která jsou pak analyzována k identifikaci rizik. Letové dráhy lze přizpůsobit specifickým potřebám projektu.

Výhody: Rychlé nasazení a flexibilita v terénu. Možnost detailní analýzy na obtížně přístupných místech. Cenově dostupnější než tradiční metody pro malé projekty.

Nevýhody: Omezená doba letu a závislost na bateriích. Nároky na legislativní povolení a řízení letového provozu. Citlivost na povětrnostní podmínky.

5.1.2. Geotechnické a hydrogeologické metody

Geotechnické metody zahrnují celou škálu technik, které sledují fyzikální vlastnosti zemin a hornin. Používají se k analýze stability svahů, identifikaci propustnosti materiálu a monitorování dlouhodobých změn (Hrubešová, 2012; Janeras et al., 2017).

Inklinometrická měření

Inklinometrie je metoda, která sleduje změny sklonu svahů a posuny zemin v časovém horizontu. Zařízení zvaná inklinometry jsou instalována do vrtů a poskytují přesná data o deformačních procesech uvnitř svahu (Rana et al., 2000). Tato metoda je často používána pro dlouhodobé sledování stability morénových hrází a rizikových oblastí. Inklinometry zaznamenávají změny sklonu uvnitř vrtu, které jsou důsledkem pohybu zeminy. Tato data jsou analyzována ke stanovení rychlosti a směru pohybu materiálu (Rana et al., 2000).

Výhody: Poskytují přesné informace o hloubkových posunech. Vhodné pro dlouhodobé sledování a včasnou detekci rizik. Možnost nasazení v kombinaci s dalšími monitorovacími metodami.

Nevýhody: Vyžadují vrtání, což je finančně a technicky náročné. Omezené na specifické lokality, kde jsou instalovány.

Měření pórových tlaků

Měření pórovitých tlaků se provádí pomocí piezometrů, což jsou citlivé nástroje instalované ve vrtech vyhloubených v podloží sledované oblasti. Tyto přístroje mohou být otevřené nebo uzavřené, přičemž volba typu závisí na očekávané velikosti tlaku a rychlosti změn podzemních vod. Otevřené piezometry měří hladinu vody, zatímco uzavřené jsou vybaveny snímači tlaku pro přímé monitorování pórových tlaků v zemině (Hrubešová, 2012). Moderní piezometry často fungují na principu vibrující struny, kde tlak vyvíjený vodou na citlivou membránovou destičku ovlivňuje napětí v drátě, což je následně převáděno na frekvenční signál. Tento signál je zaznamenán a pomocí čtecí jednotky převáděn na digitální hodnoty tlaku (Karlín, 2010; Hrubešová, 2012).

Výhody: Přesnost měření: Piezometry poskytují detailní informace o změnách pórových tlaků s vysokou citlivostí. Flexibilita aplikace: Mohou být instalovány v různých hloubkách, což umožňuje sledovat jak mělké, tak hluboké zóny. Dlouhodobé sledování: Piezometry jsou vhodné pro dlouhodobé projekty, kde se očekávají postupné změny tlaků.

Nevýhody: Časová odezva: Některé typy piezometrů, zejména v nepropustných zeminách, mohou mít delší reakční dobu na změny pórových tlaků. Nákladnost: Instalace a údržba piezometrů, včetně vrtání a kalibrace, jsou finančně náročné. Závislost na teplotě: Měřené hodnoty mohou být ovlivněny změnami teploty, což vyžaduje dodatečné kompenzace.

Metoda GBInSAR

Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar (GBInSAR) je pozemní varianta radarové technologie, která využívá podobné principy jako InSAR, ale zařízení je umístěno přímo na povrchu (Lucas et al., 2017). GBInSAR se využívá především v oblastech, kde je vyžadován detailní monitoring konkrétní lokality. Radarové vlny jsou vysílány mobilní jednotkou umístěnou v terénu a odezvy jsou analyzovány v reálném čase, což umožňuje rychlou reakci na detekované změny (Lucas et al., 2017).

Výhody: Reálno-časové sledování: Umožňuje okamžité detekce změn a výstrahy. Vysoká přesnost v lokálním měřítku: Vhodné pro kritické body, jako jsou nestabilní svahy nebo morénové hráze. Flexibilita: Možnost opakovaně měnit polohu zařízení podle potřeb.

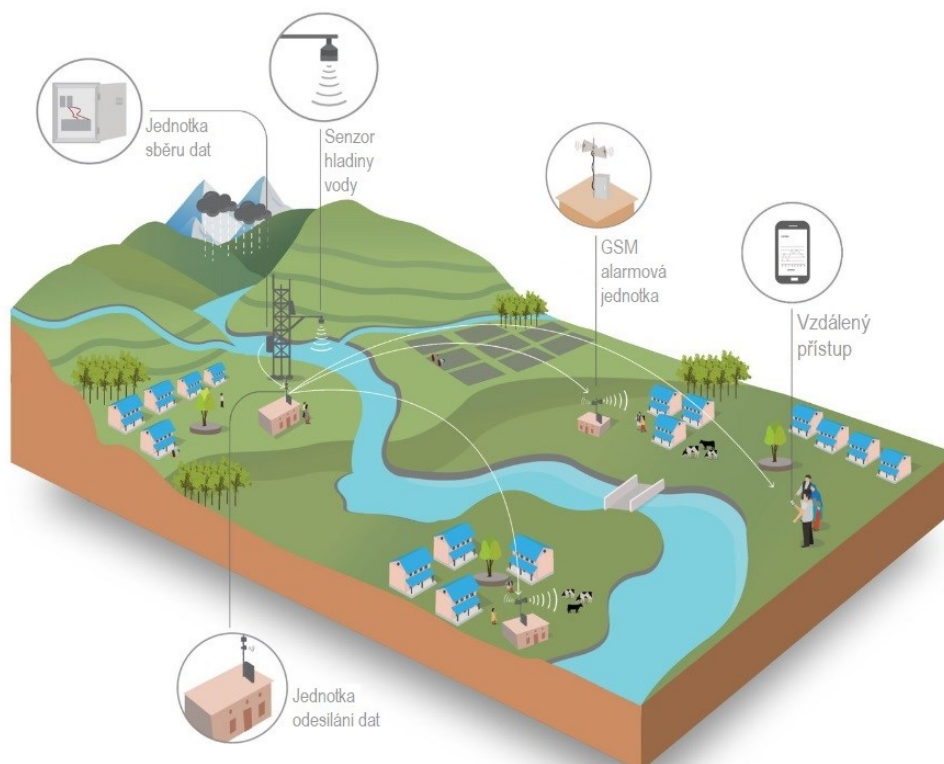
Nevýhody: Omezené pokrytí: Na rozdíl od InSAR nedokáže monitorovat rozsáhlé oblasti. Požadavek na logistiku: Vyžaduje přístup do oblasti a pravidelnou údržbu zařízení.

In-situ senzory a meteorologické stanice

Na rizikových místech se instalují senzory a meteorologické stanice pro měření klíčových faktorů, jako je hladina vody, teplota nebo množství srážek. Tyto senzory poskytují kontinuální data, která pomáhají detekovat potenciálně nebezpečné podmínky, jež by mohly destabilizovat hráze (Emmer et al., 2018). Například u jezera Tsho Rolpa v Nepálu byly instalovány senzory, které monitorují tlak vody na morénovou hráz a sezónní změny v hladině, což umožňuje preventivní zásahy v případě prudkého zvýšení hladiny vody (Rana et al., 2000).

Komunitně založené systémy včasného varování (CBFEWS)

CBFEWS, Community Based Flood Early Warning System, představuje inovativní přístup ke zvládnutí rizik povodní, který se zaměřuje na aktivní zapojení místních komunit. Tyto systémy zahrnují monitorování hladin pomocí senzorů a přenos dat prostřednictvím telekomunikačních technologií. Klíčovým prvkem je včasné varování obyvatel v ohrožených oblastech, což umožňuje efektivní evakuaci a snížení škod ('CBFEWS', 2019). Přestože CBFEWS byl primárně navržen pro říční povodně, jeho principy mohou být adaptovány pro monitoring ledovcových jezer ('Advanced CBFEWS', 2017).



Obrázek 12: CBFEWS aplikovaný na řece
Zdroj: ('CBFEWS', 2019)

Kombinace metod

Integrace různých metod, jako jsou GNSS, InSAR, a inklinometrie, poskytuje komplexní obraz o dynamice a stabilitě ledovcových jezer. Kombinace metod zajišťuje synergický efekt, kdy jednotlivé technologie doplňují svá omezení (Janeras et al., 2017). Data z různých zdrojů jsou analyzována společně, což umožňuje přesnější identifikaci rizikových oblastí a jejich dynamiky.

Výhody: Komplexní data z různých zdrojů. Větší přesnost a spolehlivost detekce. Vhodné pro dlouhodobé projekty v náročných oblastech.

Nevýhody: Vyžaduje vysoké počáteční investice a odborný personál mnoha různých oborů. Složitější analýza a správa dat.

5.2. Základní inženýrské zásahy pro prevenci rizik

Dobrá stabilita ledovcových jezer je zásadní pro ochranu níže položených oblastí před potenciálními povodněmi způsobenými průlomem morénových hrází (Richardson & Reynolds, 2000). Následující opatření jsou často implementována v rámci preventivních projektů v rizikových oblastech.

Odvodňovací systémy

Odvodňovací kanály a přelivové systémy jsou jedním z nejúčinnějších způsobů, jak snižovat hladinu vody v ohrožených jezerech a tím zmírnit tlak na morénové hráze. Tento přístup byl použit například u jezera Tsho Rolpa v Nepálu, kde byla vybudována speciální odtoková hráz, která umožňuje kontrolovaný odtok vody a snižuje riziko průlomové povodně (Rana et al., 2000). Takové systémy jsou zvláště efektivní v sezónně nestabilních oblastech, kde tání ledovců způsobuje výrazné změny hladiny vody.

Výhody: Rychlé snižování rizika průlomů. Relativně jednoduchá implementace.

Nevýhody: Omezená životnost kanálů. Potřeba časté kontroly.

Stabilizace morénových hrází

Stabilizace morénových hrází pomocí geotechnických zásahů zahrnuje použití metod, jako je zpeňování svahů nebo budování protipovodňových přehrad. Tyto zásahy pomáhají zlepšit soudržnost hrází, čímž snižují riziko sesuvů a průlomových povodní. V Peru byl například u jezera Palcacocha proveden projekt, v jehož rámci byla morénová hráz zpevněna, aby se snížilo riziko povodně podobné té, která zdevastovala město Huaraz v roce 1941 (Emmer et al., 2018). Zpevnění hrází lze realizovat buď přidáním materiálu, nebo posílením struktury pomocí geosyntetických materiálů.

Výhody: Zvýšená stabilita struktur. Možnost dlouhodobé ochrany.

Nevýhody: Vysoké náklady. Potřeba pravidelné údržby.

Umělé odtokové systémy

Regulace objemu vody v ledovcových jezerech je klíčovou metodou snižování tlaku na morénové hráze, především v případě jezer ohrožených náhlým táním ledu. Tento přístup byl využit u jezera Imja Tsho v Nepálu, kde byla voda cíleně odvedena pod kritickou hranici, což výrazně snížilo pravděpodobnost povodně v případě zvýšeného tání ledovce (Watanabe et al., 2016). Tato metoda je vhodná pro jezera, jejichž objem je možné dlouhodobě monitorovat a průběžně regulovat.

Výhody: Možnost dlouhodobé regulace. Redukce sezónní dynamiky vody.

Nevýhody: Vysoké investice. Omezená efektivita při náhlých změnách objemu vody.

6. Enviromentální a sociální aspekty

6.1. Dopad na ekosystémy v okolí jezer

Ledovcová jezera ve vysokohorských oblastech mají zásadní vliv na místní ekosystémy, přičemž fungují jako přírodní zásobárny vody a stabilizátory mikroklimatu. Přítomnost ledovcových jezer přispívá k vytváření specifického mikroklimatu s nižšími teplotami a

vyšší vlhkostí, což je příznivé pro vývoj unikátních rostlinných a živočišných druhů. Vzhledem k tání ledovců, urychlenému klimatickými změnami, však dochází k častým a rychlým výkyvům hladiny a kvality vody v těchto jezerech, což může ohrozit biodiverzitu v přilehlých ekosystémech (Neal, 2007; Vilímek et al., 2015).

Flóra a vegetační zóny

Rostliny v blízkosti ledovcových jezer jsou adaptovány na chladnější a vlhčí podmínky. Zvýšení teploty a kolísání hladiny jezer může vést ke změnám ve složení vegetace. Například s rostoucími teplotami se mohou šířit invazivní druhy, které vytlačují původní horské rostliny. Tyto druhy bývají méně odolné vůči teplotním výkyvům a změnám v hydrologii. V některých oblastech, jako je Himálaj, byly pozorovány změny ve vegetačních zónách a jejich posun do vyšších nadmořských výšek, což ovlivňuje celkovou strukturu ekosystému kolem jezer (Shrestha & Aryal, 2011).

Fauna a vliv na stanoviště

Vodní a obojživelná fauna je na vysokohorská jezera často silně vázána. Některé druhy ryb a obojživelníků jsou adaptovány na specifické podmínky, jako je nízká teplota a vysoká čistota vody. Rychlé tání ledovců vede k náhlému přítoku sedimentů do jezer, což způsobuje zakalení vody, pokles kyslíku a změnu chemického složení – tyto změny mohou vést k úbytku populací citlivých druhů. Také zvýšená sedimentace zhoršuje kvalitu vody a může vést k zanášení jezer, čímž snižuje habitat pro ryby a jiné vodní organismy (Neal, 2007; Vilímek et al., 2015). Zvýšený přísun sedimentů mění složení substrátu a způsobuje nestabilitu stanovišť, která jsou klíčová pro místní druhy rostlin a živočichů. Například zvýšená sedimentace může způsobit posun v bentických společenstvech a snížit biodiverzitu druhů vázaných na stabilní dno jezera (Emmer & Vilímek, 2014). Tato změna ovlivňuje rovněž břehová stanoviště, kde jsou druhy adaptovány na stabilní prostředí s minimálními sezónními změnami.

Přímý vliv na potravní řetězec

Změny v kvalitě a dostupnosti vody mají vliv i na potravní řetězec v těchto ekosystémech. Úbytek ryb a obojživelníků, kteří slouží jako potrava pro místní dravé ptáky a savce, může mít následky na celé potravní síť. Vysokohorské ekosystémy jsou typicky citlivé na i malé změny, což může vést k nestabilitě a zvýšené zranitelnosti celého ekosystému (Shrestha & Aryal, 2011).

6.2. Dopad na místní obyvatelstvo a socio-ekonomické faktory

Ledovcová jezera v horských oblastech jsou pro místní obyvatelstvo klíčovým zdrojem vody a energií, ale zároveň představují závažné riziko kvůli možným povodním, známým jako GLOF (glacial lake outburst floods). Vliv tání ledovců a kolísání hladiny vody v těchto jezerech je tak spojen s řadou socio-ekonomických faktorů, od zajištění základních potřeb po riziko ztráty majetku a životů.

Zásobování vodou a zemědělství

V horských oblastech, jako jsou Nepál a Bhútán, jsou obyvatelé závislí na ledovcové vodě, zejména v období sucha, kdy je voda pro zavlažování klíčová pro zemědělskou produkci. Ledovcová jezera tak plní funkci přirozených zásobáren vody, které vyrovnávají sezónní nedostatek a podporují místní zemědělství. Tání ledovců v důsledku klimatických změn však vede k nepředvídatelným výkyvům v přítoku vody, což zvyšuje nejistotu pro zemědělce, kteří jsou závislí na stabilním přísunu vody (Shrestha et al., 2007).

Vodní energie a infrastruktura

Náhlé výkyvy hladiny vody a potenciální riziko průlomových povodní (GLOF) však mohou ohrozit vodní elektrárny a jiné infrastruktury. Výstavba ochranných přehrad a stabilizačních opatření kolem těchto jezer je proto zásadní pro udržení funkční infrastruktury, ale zároveň znamená vysoké náklady na údržbu a modernizaci (Ives et al., 2010; Hala & Říha, 2016).

Sociální a kulturní dopady

GLOF mohou mít vážné důsledky pro vesnice, jejichž obyvatelé jsou často v přímé blízkosti rizikových jezer. Tato rizika nejsou pouze ekonomická, ale zahrnují i kulturní dopady, kdy může dojít ke zničení historických a duchovních míst. V roce 1941 došlo k průlomu jezera Palcacocha v Peru, což vedlo k záplavám ve městě Huaraz a ztrátě tisíců životů (Emmer et al., 2018). Místní obyvatelé i dnes čelí nejistotě a obavám o svou bezpečnost, což ovlivňuje nejen jejich každodenní život, ale i tradiční zvyky a rituály spojené s krajinou a jejími vodními zdroji (Carey, 2005).

Ekonomické důsledky a náklady na prevenci

Prevence a ochranná opatření, jako je stavba přelivových systémů a stabilizace hrází, vyžadují velké finanční investice, které jsou pro rozvojové země obtížně dosažitelné. Například odvodňovací kanál u jezera Tsho Rolpa v Nepálu byl budován s cílem snížit riziko povodně, přičemž šlo o nákladný projekt, který vyžadoval podporu mezinárodních organizací (Rana et al., 2000). Navzdory tomu zůstávají některá jezera bez adekvátní ochrany, což zvyšuje socio-ekonomické napětí v oblastech s omezenými zdroji (Shrestha & Aryal, 2011).

7. Diskuse

Myslím, že tato práce přispívá k hlubšímu pochopení problematiky vysokohorských ledovcových jezer z inženýrskogeologického hlediska a ukazuje na význam propojení teoretických poznatků s praktickými aplikacemi. Z analýzy různých typů ledovcových jezer a jejich geomorfologických, geologických a hydrologických vlastností vyplývá, že klíčová rizika, jako jsou svahové pohyby, hydraulické porušení a eroze, nelze zkoumat izolovaně. Naopak, jejich studium vyžaduje komplexní přístup, který zahrnuje nejen identifikaci

rizikových faktorů, ale také důkladné pochopení souvislostí mezi těmito faktory a specifickými podmínkami okolního prostředí. Například případy morénových jezer v Andách nebo Himálajích ilustrují, jak klimatické změny vedou k destabilizaci morénových hrází a zvyšují riziko GLOFs (Shrestha et al., 2007; Klimeš et al., 2016). Tyto příklady ukazují, že propojení teoretických modelů s daty z terénního výzkumu je zásadní pro návrh efektivních opatření.

Jedním z praktických přínosů této práce je její důraz na přehled rizik a technických a inženýrských přístupů k monitorování stability jezer. Satelitní metody, geotechnické sondy a hydrologické modely, zmíněné v práci, představují klíčové nástroje pro prevenci katastrof. Přesto by bylo možné tuto část rozšířit o podrobnější diskusi o efektivitě jednotlivých metod v různých geografických a klimatických podmínkách. Například technologie dálkového průzkumu Země mohou být mimořádně užitečné v oblastech s obtížným přístupem, zatímco geotechnické metody jsou nezbytné pro lokální detailní analýzu.

Při psaní této práce bylo klíčovým cílem poskytnout obecný přehled a propojit teoretické poznatky s praktickými aplikacemi. Přesto lze identifikovat určité metodologické limity. Například větší zapojení konkrétních kvantitativních dat, jako jsou geotechnické parametry sedimentů nebo konkrétní hodnoty změn vodní hladiny, by umožnilo vytvořit přesnější obraz o rizicích a jejich možném vývoji. Navíc by mohlo být přínosné detailněji diskutovat o socio-ekonomických dopadech, zejména v oblastech s vysokou hustotou obyvatelstva, jako jsou Himaláje.

Kritická reflexe vlastního postupu při psaní této práce ukazuje, že výběr případových studií a jejich propojení s teoretickými koncepty byl sice efektivní pro dosažení stanovených cílů, nicméně omezený rozsah práce neumožnil podrobněji rozpracovat některé aspekty, jako je vliv dlouhodobých klimatických změn na dynamiku sedimentace nebo podrobné hodnocení efektivity preventivních opatření. Tyto oblasti by mohly být předmětem dalšího výzkumu. Závěrem lze říct, že tato práce přináší důležité poznatky o problematice vysokohorských ledovcových jezer a poskytuje pevný základ pro další výzkum i praktické aplikace.

Většina studií se zaměřuje na jednotlivé případy nebo regiony, aniž by bylo analyzováno globální údaje o podobnostech mezi různými typy jezer a jejich monitoringu. Myslím, že spojování poznatků z různých oblastí je klíčové pro pochopení a prevenci rizik spojených s ledovcovými jezery. Integrovaný přístup kombinující vědecké poznatky, technologické inovace a komunitní participaci by tak mohl zajistit udržitelnější řešení problémů ledovcových jezer.

8. Závěr

Tato bakalářská práce poskytuje celistvý pohled na inženýrskogeologické problémy spojené s vysokohorskými ledovcovými jezery. Zahrnuje analýzu geomorfologických, geologických a hydrologických faktorů, které ovlivňují vznik, vývoj a stabilitu těchto jezer, a klade důraz na identifikaci a prevenci klíčových rizik.

Práce ukázala, že klimatické změny představují zásadní faktor, který zvyšuje riziko destabilizace ledovcových jezer. Tání ledovců vede nejen k nárůstu počtu a objemu jezer, ale také k častějším událostem, jako jsou *glacial lake outburst floods* (GLOFs). Identifikované rizikové faktory, včetně svahových pohybů, hydraulického porušení a eroze, zdůrazňují potřebu systematického monitorování a cílených inženýrských opatření.

Jedním z hlavních přínosů této práce je shrnutí rizik a dostupných metod monitorování ledovcových jezer, od satelitních technologií přes geotechnické a hydrologické přístupy až po preventivní inženýrská řešení. Tato metodika byla průběžně doplněna o případy konkrétních studií z oblastí Himalájí, And a dalších vysokohorských regionů. Tyto příklady ilustrují, jak kombinace teoretických poznatků a praktických opatření přispívá ke zlepšení bezpečnosti v ohrožených oblastech.

Důležitou součástí práce byla rovněž reflexe environmentálních a sociálních aspektů. Ledovcová jezera významně ovlivňují místní ekosystémy i lidské komunity, což vyžaduje integrovaný přístup ke správě rizik. Zatímco některé inženýrské zásahy mohou snížit okamžitá rizika, je nezbytné brát v úvahu i dlouhodobé dopady na biodiverzitu a životní podmínky obyvatel.

Při tvorbě práce se ukázalo, že další výzkum by měl být zaměřen na podrobnou analýzu klíčových parametrů, jako jsou fyzikálně-mechanické vlastnosti sedimentů a dynamika tání ledu. Rovněž by bylo přínosné rozšířit zkoumání socio-ekonomických dopadů těchto jevů, zejména v regionech s vysokou hustotou obyvatelstva. Celkově tato práce nabízí obecné shrnutí problematiky vysokohorských ledovcových jezer a poskytuje teoretický i praktický základ pro budoucí výzkum a inženýrské aplikace.

9. Seznam literatury

- Allen, S., Frey, H. & Huggel, C.**, 2017. Assessment of Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions. Technical Guidance Document. doi: 10.13140/RG.2.2.26332.90245
- An Advanced Community-based Flood Early Warning System - ICIMOD**, 2017, April 17. Retrieved 8 December 2024, from <https://www.icimod.org/an-advanced-community-based-flood-early-warning-system/>
- Bajracharya, S.R. & Mool, P.**, 2009. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology* **50**(53): 81–86. doi: 10.3189/172756410790595895
- Benn, D. & Evans, D.J.A.**, 2014. *Glaciers and Glaciation*, 2nd edition. Routledge: 0 ed. doi: 10.4324/9780203785010
- Bennett, M.M.**, 2009. *Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms*. John Wiley & Sons, Incorporated (Newark): 2nd ed, 1 pp.
- Bolch, T., Shea, J.M., Liu, S., Azam, F.M., Gao, Y., Gruber, S., Immerzeel, W.W., Kulkarni, A., Li, H., Tahir, A.A., Zhang, G. & Zhang, Y.**, 2019. Status and Change of the Cryosphere in the Extended Hindu Kush Himalaya Region. *In*: P. Wester, A. Mishra, A. Mukherji, & A.B. Shrestha (eds.): *The Hindu Kush Himalaya Assessment*. Springer International Publishing (Cham): pp. 209–255. doi: 10.1007/978-3-319-92288-1_7
- Caduff, R., Schlunegger, F., Kos, A. & Wiesmann, A.**, 2015. A review of terrestrial radar interferometry for measuring surface change in the geosciences. *Earth Surface Processes and Landforms* **40**(2): 208–228. doi: 10.1002/esp.3656
- Carey, M.**, 2005. Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global and Planetary Change* **47**(2–4): 122–134. doi: 10.1016/j.gloplacha.2004.10.007
- Carlà, T., Tofani, V., Lombardi, L., Raspini, F., Bianchini, S., Bertolo, D., Thuegaz, P. & Casagli, N.**, 2019. Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment. *Geomorphology* **335**: 62–75. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.03.014
- Carrivick, J.L. & Tweed, F.S.**, 2013. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. *Quaternary Science Reviews* **78**: 34–52. doi: 10.1016/j.quascirev.2013.07.028
- CBFEWS - How does it work? - ICIMOD**, 2019, December 24. Retrieved 28 November 2024, from <https://www.icimod.org/mountain/cbfews-how-does-it-work/>
- Clague, J. & Evans, S.G.**, 2000. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews* **19**(17–18): 1763–1783. doi: 10.1016/S0277-3791(00)00090-1
- Clarke, G.K.C., Jarosch, A.H., Anslow, F.S., Radić, V. & Menounos, B.**, 2015. Projected deglaciation of western Canada in the twenty-first century. *Nature Geoscience* **8**(5): 372–377. doi: 10.1038/ngeo2407
- Crosta, G.B., Di Prisco, C., Frattini, P., Frigerio, G., Castellanza, R. & Agliardi, F.**, 2014. Chasing a complete understanding of the triggering mechanisms of a large rapidly evolving rockslide. *Landslides* **11**(5): 747–764. doi: 10.1007/s10346-013-0433-1
- Dahal, R.K. & Hasegawa, S.**, 2008. Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology* **100**(3–4): 429–443. doi: 10.1016/j.geomorph.2008.01.014
- Deline, P., Gruber, S., Delaloye, R., Fischer, L., Geertsema, M., Giardino, M., Hasler, A., Kirkbride, M., Krautblatter, M., Magnin, F., McColl, S., Ravel, L. & Schoeneich,**

- P.**, 2015. Ice Loss and Slope Stability in High-Mountain Regions. *In: Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*. Elsevier: pp. 521–561. doi: 10.1016/B978-0-12-394849-6.00015-9
- Emmer, A. & Cochachin, A.**, 2013. The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera Blanca, North American Cordillera, and Himalayas. *AUC GEOGRAPHICA* **48**(2): 5–15. doi: 10.14712/23361980.2014.23
- Emmer, A. & Vilímek, V.**, 2013. Review Article: Lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: an example from the Cordillera Blanca (Peru). *Natural Hazards and Earth System Sciences* **13**(6): 1551–1565. doi: 10.5194/nhess-13-1551-2013
- Emmer, A. & Vilímek, V.**, 2014. New method for assessing the susceptibility of glacial lakes to outburst floods in the Cordillera Blanca, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences* **18**(9): 3461–3479. doi: 10.5194/hess-18-3461-2014
- Emmer, A., Vilímek, V., Huggel, C., Klimeš, J. & Schaub, Y.**, 2016. Limits and challenges to compiling and developing a database of glacial lake outburst floods. *Landslides* **13**(6): 1579–1584. doi: 10.1007/s10346-016-0686-6
- Emmer, A., Vilímek, V. & Zapata, M.L.**, 2018. Hazard mitigation of glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru): the effectiveness of remedial works. *Journal of Flood Risk Management* **11**(S1). doi: 10.1111/jfr3.12241
- Eriksson, M.**, 2011. In the Shadow of Melting Glaciers—Climate Change and Andean Society. *Mountain Research and Development* **31**(1): 70. doi: 10.1659/mrd.mm079
- Geoinformatika - Globální polohovací a navigační satelitní systémy**, n.d. Retrieved 10 December 2024, from <http://geologie.vsb.cz/geoinformatika/kap09.htm>
- Geologická rizika | Česká geologická služba**, n.d. Retrieved 10 December 2024, from <https://cgs.gov.cz/veda-a-vyzkum/geologicka-rizika>
- Glacial Deposits**, 2021, April 12. Retrieved 11 December 2024, from Geosciences LibreTexts website: [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Geography_\(Physical\)/The_Environment_of_the_Earth's_Surface_\(Southard\)/07%3A_Glaciers/7.12%3A_Glacial_Deposits](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Geography_(Physical)/The_Environment_of_the_Earth's_Surface_(Southard)/07%3A_Glaciers/7.12%3A_Glacial_Deposits)
- Hala, M. & Říha, J.**, 2016. Mezní stavy porušení zemin filtračními deformacemi. *Vodní Hospodářství* **66**(11/2016): s. 9-14.
- Hambrey, M.J. & Alean, J.**, 2004. *Glaciers*. Cambridge University Press (Cambridge, UK ; New York, NY, USA): 2nd ed, 376 pp.
- Highland, L.M. & Bobrowsky, P.**, 2008. *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 1. vyd, 147 pp. Retrieved from 10.3133/cir1325
- Honzejková, A.**, 2019. Stabilita svahů v okolí ledovců ve vysokých pohořích světa (Bakalářská práce, Karlova univerzita; 39 pp.). Karlova univerzita, Praha. Retrieved from <https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/108594/130259762.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Horák, V., Paseka, A. & Pospíšil, P.**, 2005. *Mechanika hornin: učební texty* [FAST VUT Brno]. Retrieved from <https://geotech.fce.vutbr.cz/vyuka/bakalarske-studium/bf005-mechanika-hornin/ucebni-texty/>
- Hrubešová, E.**, 2012, August 6. Podklady pro přednášky | Geotechnika. Retrieved 10 December 2024, from <https://geotechnici.cz/predmety/geotechnicky-monitoring/studijni-materialy/podklady-pro-prednasky/>

- Huggel, C., Clague, J.J. & Korup, O.**, 2012. Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms* **37**(1): 77–91. doi: 10.1002/esp.2223
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L.**, 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* **11**(2): 167–194. doi: 10.1007/s10346-013-0436-y
- Ives, J.D., Shrestha, R.B. & 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): 0 ed. doi: 10.53055/ICIMOD.521
- Janeras, M., Jara, J.-A., Royán, M.J., Vilaplana, J.-M., Aguasca, A., Fàbregas, X., Gili, J.A. & Buxó, P.**, 2017. Multi-technique approach to rockfall monitoring in the Montserrat massif (Catalonia, NE Spain). *Engineering Geology* **219**: 4–20. doi: 10.1016/j.enggeo.2016.12.010
- Kachlík, V. & Chlupáč, I.**, 2001. *Základy geologie, Historická geologie*. Karolinum (Praha): 343 pp.
- Karlín, P.**, 2010. Monitoring sedání podloží násypů dopravních staveb (Bakalářská práce; 25 pp.). Praha. Retrieved from https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/39397/BPTX_2009_1_11310_0_200426_0_79600.pdf?sequence=1
- Klímeš, J., Benešová, M., Vilímek, V., Bouška, P. & Cochachin Rapre, A.**, 2014. The reconstruction of a glacial lake outburst flood using HEC-RAS and its significance for future hazard assessments: an example from Lake 513 in the Cordillera Blanca, Peru. *Natural Hazards* **71**(3): 1617–1638. doi: 10.1007/s11069-013-0968-4
- Klímeš, J., Novotný, J., Novotná, I., De Urries, B.J., Vilímek, V., Emmer, A., Strozzi, T., Kusák, M., Rapre, A.C., Hartvich, F. & Frey, H.**, 2016. Landslides in moraines as triggers of glacial lake outburst floods: example from Palcacocha Lake (Cordillera Blanca, Peru). *Landslides* **13**(6): 1461–1477. doi: 10.1007/s10346-016-0724-4
- Klímeš, J., Novotný, J., Rapre, A.C., Balek, J., Zahradníček, P., Strozzi, T., Sana, H., Frey, H., René, M., Štěpánek, P., Meitner, J. & Junghardt, J.**, 2021. Paraglacial Rock Slope Stability Under Changing Environmental Conditions, Safuna Lakes, Cordillera Blanca Peru. *Frontiers in Earth Science* **9**: 607277. doi: 10.3389/feart.2021.607277
- Lucas, D.R., Fankhauser, K. & Springman, S.M.**, 2017. Application of geotechnical and geophysical field measurements in an active alpine environment. *Engineering Geology* **219**: 32–51. doi: 10.1016/j.enggeo.2016.11.018
- Neal, E.G.**, 2007. Hydrology and glacier-lake-outburst floods (1987–2004) and water quality (1998–2003) of the Taku River near Juneau, Alaska (U.S. Geological Survey No. Scientific Investigations Report 2007–XXXX, 28 p). Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/sir/2007/5027/pdf/sir20075027.pdf>
- Nemčok, A., Pašek, J. & Rybář, J.**, 1974. Dělení svahových pohybů. (Praha): p. s. 77-97.
- Nývlt, D.**, 2013. Ledovcové tvary reliéfu a doby ledové. Studijní materiál presented at the Brno. (Brno). Retrieved from https://is.muni.cz/el/sci/podzim2013/Z0026/um/44409285/Lekce4_ledovce_doby_ledove.pdf
- Rana, B., Shrestha, A.B., Reynolds, J.M., Aryal, R., Pokhrel, A.P. & Budhathoki, K.P.**, 2000. Hazard assessment of the Tsho Roipa Glacier Lake and ongoing remediation measures. *Journal of Nepal Geological Society* **22**. doi: 10.3126/jngs.v22i0.32432
- Reynolds Geo-Sciences**, 2003. Development of Glacial Hazard and Risk Minimisation Protocols in Rural Environments: Guidelines for the Management of Glacial Hazards and Risks. REYNOLDS GEO-SCIENCES.

- Reynolds, J.M., Dolecki, A. & Portocarrero, C.**, 1998. The construction of a drainage tunnel as part of glacial lake hazard mitigation at Hualcán, Cordillera Blanca, Peru. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications **15**(1): 41–48. doi: 10.1144/GSL.ENG.1998.015.01.05
- Richardson, S.D. & Reynolds, J.M.**, 2000. An overview of glacial hazards in the Himalayas. Quaternary International **65–66**: 31–47. doi: 10.1016/S1040-6182(99)00035-X
- Rozsypal, A.**, 2008. Inženýrské stavby: řízení rizik. JAGA (Bratislava): 1. vyd., 174 pp.
- Schuster, R.L.**, 2004. Usoi Landslide Dam and Lake Sarez, Pamir Mountains, Tajikistan. Environmental and Engineering Geoscience **10**(2): 151–168. doi: 10.2113/10.2.151
- Sedláček, J.**, 2008. Studium sedimentů kontinentálního zalednění ve východní části Opavska Studium sedimentů kontinentálního zalednění ve východní části Opavska (Diplomová práce, Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta). Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Brno. Retrieved from <https://is.muni.cz/th/kmnztc/>
- Shrestha, A.B. & Aryal, R.**, 2011. Climate change in Nepal and its impact on Himalayan glaciers. Regional Environmental Change **11**(S1): 65–77. doi: 10.1007/s10113-010-0174-9
- Shrestha, B., Mool, P.K. & Bajracharya, S.R.**, 2007. Impact of Climate Change on Himalayan Glaciers and Glacial Lakes: Case Studies on GLOF and Associated Hazards in Nepal and Bhutan. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD) (Kathmandu, Nepal): 0 ed. doi: 10.53055/ICIMOD.470
- Vilímek, V., Klimeš, J., Emmer, A. & Benešová, M.**, 2015. Geomorphologic impacts of the glacial lake outburst flood from Lake No. 513 (Peru). Environmental Earth Sciences **73**(9): 5233–5244. doi: 10.1007/s12665-014-3768-6
- Watanabe, T., Byers, A.C., Somos-Valenzuela, M.A. & McKinney, D.C.**, 2016. The Need for Community Involvement in Glacial Lake Field Research: The Case of Imja Glacial Lake, Khumbu, Nepal Himalaya. In: R. Singh, U. Schickhoff, & S. Mal (eds.): Climate Change, Glacier Response, and Vegetation Dynamics in the Himalaya. Springer International Publishing (Cham): pp. 235–250. doi: 10.1007/978-3-319-28977-9_13
- Wieczorek, G.F. & Jäger, S.**, 1996. Triggering mechanisms and depositional rates of postglacial slope-movement processes in the Yosemite Valley, California. Geomorphology **15**(1): 17–31. doi: 10.1016/0169-555X(95)00112-I
- Ziegler, V.**, 1996. Všeobecná geologie. Karolinum (Praha): 1. vyd, 139 pp.