

SESUVY A POVODNĚ Z LEDOVCOVÝCH JEZER

Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR (dr. Jan Klimeš) ve spolupráci s Katedrou fyzické geografie a geoekologie PŘF UK (doc. Vít Vilímek) a Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka (Ing. Miroslava Benešová, dr. Petr Bouška) řeší od roku 2011 badatelský projekt, který se týká peruánského pohoří Cordillera Blanca. Jde o hodnocení přírodních nebezpečí (sesuvů a povodní z ledovcových jezer) ve vybraných ledovcových údolích s využitím monitoringu srážek a infiltrace vody do půdy, archivních informací, terénního mapování a interpretace dat dálkového průzkumu.

Cordillera Blanca je tropické pohoří s největším pokrytím ledovci na světě – alespoň prozatím. Přestože mnohé jeho vrcholy přesahují 6000 metrů nadmořské výšky (nejvyšší Huascarán měří 6768 metrů), ledovce z něj v důsledku měnícího se chodu srážek a teplot ustupují. Zatímco v roce 1930 pokrývaly plochu přes 800 km², v roce 1970 to bylo 721 km² a v roce 1996 již jen 600 km². Nicméně zaledňuje se již od konce tzv. malé doby ledové, tedy přibližně po dobu 200 let.

Bez ohledu na to, do jaké míry jsou pozorované změny klimatu v pohoří Cordillera Blanca součástí globálních změn nebo na ně má výraznější vliv lidská činnost, má úbytek horských ledovců konkrétní dopady pro peruánskou společnost. Místní ledovce jsou totiž významným zdrojem vody pro zemědělství, průmysl a výrobu elektrické energie. Existují obavy, že by jejich výrazný ústup významně snížil schopnost doplňovat vodu do říčního systému během půlročního období sucha (květen – září), kdy je voda zadržena v ledovcových jezerech a ledovcích jediným zdrojem. Snížení množství vody v řekách v období sucha by ohrozilo intenzivní zemědělskou výrobu na pouštním pobřeží Pacifiku a zkomplikovalo výrobu elektrické energie. Znamenalo by také nebezpečí pro zemědělskou produkci obyvatel horských údolí, protože části z nich slouží jako hlavní zdroj obživy. Pokles průtoků v řekách by vzhledem k nedokonalému odpadnímu systému zhoršil kvalitu vody.

Kromě toho, že pohoří Cordillera Blanca plní funkci zásobárny pitné vody, vznikají zde nebezpečné přírodní procesy, které ohrožují obyvatele dolních částí horských údolí, kde leží mnohá města včetně hlavního provinčního centra Huarazu s 90 000 obyvateli. Jedním z nebezpečných procesů jsou laviny ledu a kamení, které se tvoří v blízkosti vrcholů hor a mohou dosahovat vysokých rychlostí a velkých objemů. Nejničivější lavina vznikla na severním vrcholu Huascaránu během zemětřesení v roce 1970. Pohybovala se rychlostí až 335 km/h a její odhadovaný objem byl 50–100 milionů m³. Pohybující se materiál pokryl ob-



VŠECHNA FOTA: ARCHIV ÚSMH AV ČR

last o rozloze více než 25 km² včetně měst Yungay a Ranrahirca, kde podle různých odhadů zahynulo mezi 23 000 a 25 000 obyvateli. Rozsah této laviny byl čtyřikrát větší než událost z roku 1962, jež se stala ve stejné části Huascaránu, ovšem byla přibližně o polovinu menší než mohutné prehistorické laviny, jejichž dosah byl identifikován během terénního mapování. K podobným jevům menšího měřítka dochází v celém pohoří mnohem častěji, ovšem badatelé kvůli jeho odlehlosti evidují jen malou část z nich.

Podle historických záznamů jsou častějšími a srovnatelně ničivými procesy povodně, které vznikají v důsledku protržení hrází ledovcových jezer. Takových událostí je z pohoří Cordillera Blanca známo celkem 20; podle dostupných informací si vyžádaly kolem 4500 obětí. Nejničivější byla povodeň po protržení hráze jezera Palcacocha, z něhož se uvolnilo minimálně 9 000 000 m³ vody, a zničilo tak část Huarazu. Největší

Místo vzniku sesuvu z levé strany morénové hráze jezera Palcacocha z března 2003 (na snímku vpravo). Sesuv způsobil osm metrů vysokou vlnu, jež se přelila přes zpevněnou hráz a zapříčinila povodeň; ta zničila úpravnu vody pro krajské město Huaraz.

představujeme projekty



Šipky znázorňují trajektorii skalní a ledové laviny ze severního vrcholu Huascaránu nad zničenými městy Yungay a Ranrahirca. Lavina se pohybovala rychlostí 200–300km/h.

ekonomické škody způsobila povodeň z jezera Jancaurish, která v roce 1950 prakticky zlikvidovala téměř dostavěnou hydroelektrárnu na řece Santa a stala se nejvýraznějším impulzem k plánování a realizaci technických bezpečnostních opatření na desítkách jezer v pohoří Cordillera Blanca.

Povodně z ledovcových jezer představují komplexní problém, který lze rozdělit do tří základních okruhů. První tvoří příčiny vzniku povodní ovlivňované celým souborem vlastností samotných jezer, jejich hrází i okolních, většinou alespoň z části zaledněných horských svahů. Dalším okruhem je velikost a plošný rozsah povodní, který je možné charakterizovat záplavovými čarami, hloubkou a rychlostí proudění a jenž je ovlivněn hlavně celkovým objemem povodně a morfologií horských údolí. Na to navazuje zonace nebezpečí (hazardu) a její uplatnění při praktickém rozvoji dotčených oblastí.

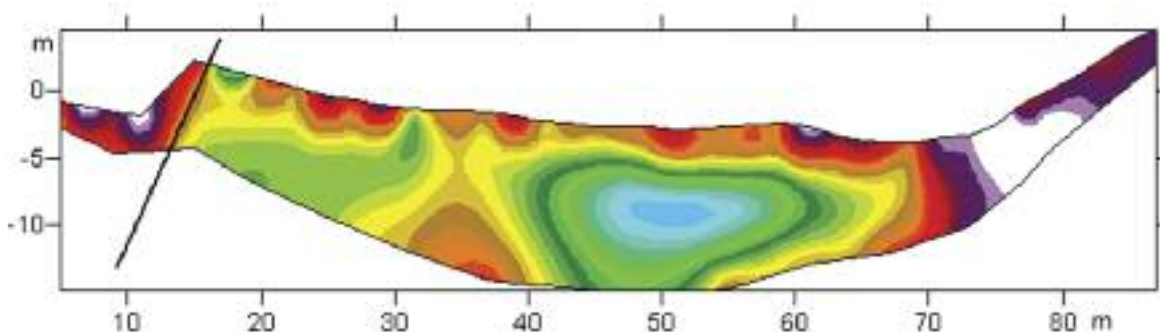
Ukazuje se, že nejčastějším důvodem protržení ledovcových hrází nebo jejich přelití je pád ledu nebo hornin do jezera ve formě lavin nebo skalních řícení. Konkrétní podmínky a příčiny vzniku těchto svahových deformací známe pouze v hrubých rysech. Je zřejmé,

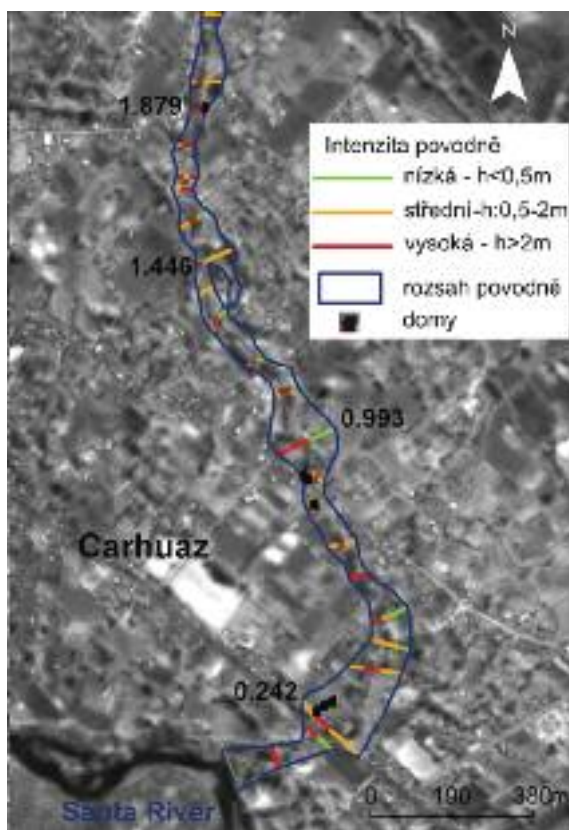
že se laviny tvoří na prudkých skalních svazích, kde je homina v blízkosti povrchu silně dezintegrována a kde se nahromadilo dostatečné množství ledu a sněhu. Jednoznačným spouštějícím faktorem lavin jsou zemětřesení, byť vznikají i v obdobích seizmicky klidných, kdy je jejich vznik spojen s regulačními procesy – během krátkého časového úseku kolísá teplota kolem nuly, tudíž voda opakovaně rozmrzá a zamrzá v puklinách ledu a skal. To může vést k narušení stability svahu a jeho pádu. Mohou se také odломit bloky ledu v důsledku přirozeného vývoje horských ledovců.

Skutečnost, že se může hráz protrhnout i bez pádu tělesa do jezera, naznačuje již zmiňovaný případ jezera Palcacocha, kdy žádný takový jev nebyl prokázán. V těchto případech může protržení nastat po sesutí vnějšího svahu hráze. Přelití vody přes hráz může pro změnu způsobit sesutí zemních hmot z vnitřního svahu hráze do jezera. Tyto sesuvy vznikají v důsledku změn v proudění a úrovni hladiny podzemní vody uvnitř tělesa hráze. K těmto změnám může vést sufoze, změna úrovně hladiny vody v jezeře, zasakování vody do morénové hráze z okolních svahů, tání pohřbeného ledu a intenzivní srážky. Podmínky a příčiny vzniku sesuvů morénových hrází se v současnosti sledují u dvou ledovcových jezer (Palcacocha a Uruashraju), kde se od roku 2008 nacházejí srážkoměrné stanice, čidla půdní vlhkosti a od roku 2012 i čidla sání. Vlhkost půdy se sleduje ve dvou hloubkových horizontech (0,3 a 0,6 metru), byť terénní pozorování naznačují existenci mnohem hlouběji položených zvodnělých poloh uvnitř morény. Ty se tvoří v důsledku vsakování vody z okolních svahů, a to i během období sucha. Vzájemné vztahy morénových sedimentů, na ně navazujících svahovin a skalního podloží se zkoumají pomocí elektrické odporové tomografie u jezera Palcacocha. Šest geofyzikálních profilů poskytlo spolu s podrobným geomorfologickým mapováním rovněž údaje o průběhu odlučných ploch sesuvů na vnitřním svahu morény jezera.

Pro hodnocení stability morénových hrází je důležité znát základní mechanické vlastnosti materiálu, který je tvoří. Z hrází jsme proto z obou zkoumaných jezer odebrali více než 20 porušených vzorků zemin včetně směsného vzorku o celkové hmotnosti 27 kilogramů. U vzorků jsme popsali zrnitost, určili sypané úhly a mineralogické složení jak jílové frakce, tak větších zrn. Výsledky potvrzují značnou heterogenitu materiálu morén, které jsou tvořeny jílovitými štěrky až písčitymi jíly.

Geofyzikální řez vytvořený metodou elektrické odporové tomografie zachycuje morénu jezera Palcacocha (vlevo) a skalní svah (vpravo). Na moréně jsou patrná místa s vysokými odpory (bílá až fialová barva), která představují omezení tahového příkopu svahové deformace, jejíž odlučná stěna je naznačena černou linií. Nízké odpory (světle modrá oblast) zřejmě souvisí se silně zvodněnými polohami morény.





Avšak i přes tyto rozdíly a přes odlišný typ hornin podloží v okolí obou jezer byly zjištěné průměrné hodnoty sypaných úhlů u obou lokalit velmi podobné a pohybují se v rozmezí 34,7°–35,7°. Podrobnější informace o pevnostních charakteristikách morénových sedimentů poskytnou krabicové smykové zkoušky, které se realizují v laboratořích firmy ARCADIS Geotechnika, a. s. Veškeré informace ohledně podmínek vzniku sesuvů u těchto dvou vybraných jezer použijeme pro výpočet stability konkrétních svahů a následné zobecnění některých získaných výsledků na morénové hráze dalších jezer, kde jsou srovnatelné podmínky vzniku sesuvů.

Předpověď pravděpodobnosti výskytu povodně o určité intenzitě je nezbytným předpokladem pro zónaci ohrožení horských údolí. Reálná předpověď doby vzniku povodní o určité velikosti formou n-letosti jejich výskytu je vzhledem k velmi malé databázi historických událostí nemožná. Definovat ale lze realistické scénáře, kdy je vztah doba opakování – velikost události stanoven expertně. Na základě dostatečně podrobných a spolehlivých dat je ovšem možné realisticky modelovat průběh povodně o určité velikosti. Takový model umožní identifikovat místa, jež by povodeň zasáhla. Pro tento účel jsme připravili 1D matematický model zájmové lokality, na němž jsme modelovali povodeň z 11. dubna 2010; model byl vytvořen z podrobně zaměřených příčných profilů získaných během dvou geodetických měření v terénu. Pro stanovení kulminačního průtoku jsme také zaměřili dvě

povodňové stopy v dolní části modelu. Velkou pozornost jsme věnovali podrobnému popisu charakteru povrchu v jednotlivých topografických profilech. Výsledky simulace povodňové události – její rozsah a hloubky v jednotlivých profilech – jsme ověřili na základě informací z terénu. Dále bylo možné definovat intenzitu povodně pro jednotlivé zpracované profily. Zkušenosti získané při vytváření tohoto modelu využijeme při modelování scénářů budoucích možných povodní větších velikostí.

Badatelské práce participujících českých institucí se uskutečňují v kooperaci s pracovištěm Národního vodohospodářského úřadu Peru (Autoridad Nacional de Agua – ANA) v Huarazu, s nímž Ústav struktury a mechaniky hornin letos na jaře podepsal dohodu o technické spolupráci; smlouva zahrnuje společné terénní výzkumy a publikování získaných výsledků. Aktu předání dohody se 8. června 2012 v Limě zúčastnili český velvyslanec v Peru Vladimír Eisenbrug, ředitel ANA dr. Hugo E. Jara Facundo a představitel ÚSMH (dr. Jan Klimeš) a Přírodovědecké fakulty UK (doc. Vít Vilímek). Vzhledem k dobrým vztahům s ANA věříme, že se získané znalosti a informace i nadále využijí při ochraně obyvatel před přírodními nebezpečími nejen v pohoří Cordillera Blanca, ale i v jiných částech peruánských And. ■

JAN KLIMEŠ,

Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i.,

VÍT VILÍMEK,

Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy,

MIROSLAVA BENEŠOVÁ a PETR BOUŠKA,

Výzkumný ústav vodohospodářský

T. G. Masaryka, v. v. i.

Na podkladu satelitního snímku jsou znázorněny dolní toky řeky Chucchun a její soutok s řekou Santa (pohoří Cordillera Blanca, Peru). Modře je vyznačen modelovaný rozsah povodně z 11. dubna 2010 a jednotlivé příčné profily, jež jsou na základě hloubky (h) klasifikovány do tříd intenzity povodně. Většina domů postižených povodní se nacházela v místech se střední intenzitou.



Pohled na protržené jezero Palcacocha pod horskými štíty, které dosahují výšky kolem 6200 metrů nadmořské výšky. Sto metrů vysoká morénová hráz se protrhla v roce 1941. Výsledná povodeň zničila velkou část města Huaraz.