

Současná příroda Krkonoš je dílem dávných ledovců

Není tomu tak dávno, co si čtenáři *Živy* mohli přečíst o unikátních fenoménech neživé přírody Krkonoš z pera Vlastimila Pilouse (*Živa* 2013, 4: 160–163). Obšírný výklad vzniklý u příležitosti 50. výročí vzniku Krkonošského národního parku nenechá nikoho na pochybách, že neživá příroda v podobě horninového podloží a reliéfu je klíčovým faktorem dnešního vzhledu krkonošské krajiny včetně těch nejvzácnějších biotopů a druhů. Hodnota Krkonoš je dána právě souhrou řady faktorů, od prvohorních geologických struktur s významnou rolí tektoniky po vliv ledovců ve čtvrtohorách nebo účinky dnešního klimatu. Jestli však lze vybrat jeden faktor neživé přírody, zasluhující zvýšenou pozornost, jsou to právě čtvrtohorní ledovce, o kterých ví sice skoro každý, ale zároveň jsou opředeny množstvím nejasností. Málokterý fenomén, ačkoli již zaniklý, má ovšem tak zásadní roli pro dnešní přírodu.

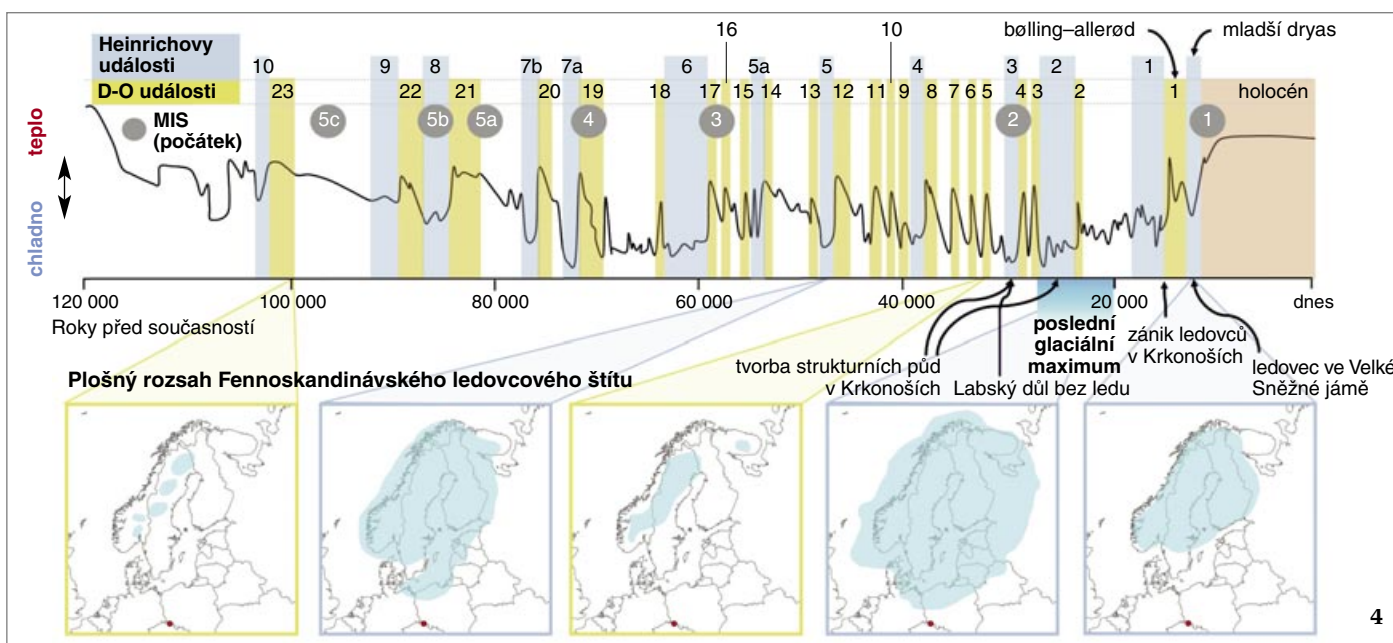
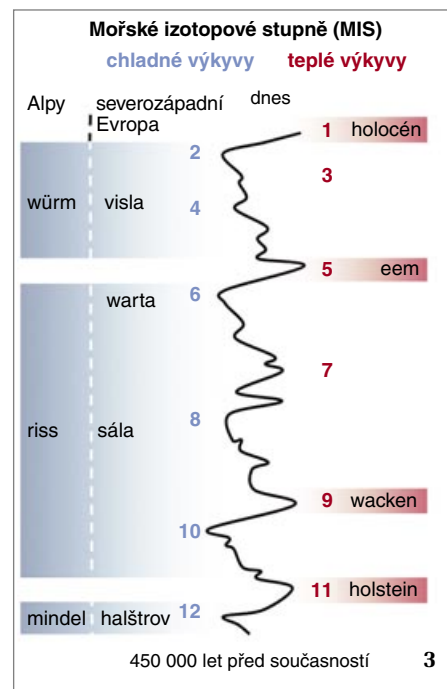
Poznávání

Píše se závěr 19. století, v Evropě známé období Belle Époque. Doba velkého průmyslového i kulturního rozmachu společnosti má blahodárny vliv mimo jiné na vědu a zkoumání přírody. Touha po poznání a pokroku nezná hranic a je možná alespoň trochu srovnatelná s tím, co zažíváme dnes na poli rozvoje moderních technologií. Jsme však stále ještě v období před 130 lety, a přestože biologické vědy nebo např. mineralogie mají značný náskok,

v geomorfologii jde často stále ještě o objevování základních poznatků. V r. 1894 přichází tehdy třiačtyřicetiletý profesor geografie na Vratislavské univerzitě Joseph Partsch s přelomovou knihou, která je hojně citována dodnes – *Vergletscherung des Riesengebirges* (Zalednění Krkonoš). Rodák ze Sklářské Poruby na severní straně hor byl od dětství fascinován dvojicí dokonale vyvinutých karů Sněžných jam a právě on se stává autorem první souhrnné publikace, která podává na tehdejší dobu

nesmírně detailní a odborný popis stop po dávných ledovcích. O několik let později prochází podrobně Krkonoše také saský geograf Alfred Rathsburg. Kromě Krkonoš se pohybuje ve Vogézách, Schwarzwald, Harzu, na Šumavě, v Krušných horách i v Hrubém Jeseníku. Jeho dílo *Die Gletscher der Eiszeit in den höheren deutschen Mittelgebirgen* (Ledovce doby ledové ve vyšších německých středohorách), vydané po částech v časopise *Firgenwald* mezi lety 1932 a 1935, je doposud jediným uceleným shrnutím poznatků o zaniklých ledovcích v horských oblastech střední Evropy. Z českých autorů je třeba jmenovat Františka Vitáska, jehož příspěvek *Naše hory ve věku ledovém*, vydaný ve Sborníku Československé společnosti zeměpisné v r. 1924, je prvním komplexním shrnutím zalednění českých a slovenských hor. Mezi vynikající badatele krkonošského zalednění, kteří působili v druhé polovině 20. století, patří Josef Sekyra, známý jako první Čech, který dosáhl jižního pólu. Výčet osobností zabývajících se krkonošskými ledovci není zdaleka kompletní, nicméně i tak ukazuje, jak velký zájem téma dávných ledovců budí od prvního okamžiku, kdy se přišlo na jejich existenci. Dnes má glaciální geomorfologie jako suverénní vědní disciplína k dispozici celou řadu metod, které by J. Partschovi braly dech. Mezi ně patří přesné datování pomocí kosmogenických radionuklidů nebo velmi přesné digitální modely reliéfu odvozené z laserového skenování povrchu. Dnešní badatelé by si bez nich již ani nedokázali představit svou práci. Na druhou stranu, jak by asi obstáli při tvorbě dokonale přesné mapy Sněžných jam, jakou zvládl právě J. Partsch (obr. 2 vlevo) před 130 lety? Dodejme, že jeho mapa v podstatě odpovídá laserovým datům (obr. 2 vpravo), jak lze vidět z jejich srovnání.





- Kůrovcová kalamita se postarala o pěkný výhled z cesty do Modrého dolu. V popředí horninové bloky boční morény ledovce Obřího dolu, v pozadí charakteristické ledovcové údolí Obřího dolu, jehož příčný profil ukazuje obr. 10.
- Sněžné jámy s morénami na mapě Josepha Partsch (1894, vlevo) a na digitálním modelu reliéfu vzniklého z leteckého laserového skenování (vpravo, geoportal.gov.pl)
- Glaciály a interglaciály mají různé regionální názvy – v Evropě rozlišujeme klasifikaci alpskou a severoevropskou. Nejpraktičtější je však použití mořských izotopových stupňů (MIS), které jsou globální (bližší v textu).
Upraveno podle: J. Ehlers a kol. (2011)
- Poslední glaciál byl klimaticky velmi pestrý. Zahrnoval 10 chladných, tzv. Heinrichových událostí, a 23 teplých, tzv. Dansgaardových–Oeschgerových (D-O) událostí. Pro ilustraci je ve vybraných časových řezech nastíněn i měnící se rozsah Fennoskandinávského

ledovcového štítu. Upraveno podle: L. Olsen a kol. (2013)

Příčina

Ve stejné době, kdy Joseph Partsch objevil stopy krkonošského zalednění, bádali v Alpách a jejich severním předhůří němečtí geografové Eduard Brückner a Albrecht Penck. Podařilo se jim zjistit, že morény maximálního rozsahu zalednění Alp, které bylo de facto plošné, pouze s nejvyššími vrcholy vystupujícími z ledu, se nacházejí ve více polohách. Proto odvodili, že byly Alpy zaledněny opakovaně a rozsah zalednění se měnil. Vznikl koncept čtyř dob ledových (glaciálů), pojmenovaných günz, mindel, riss a würm (obr. 3), který byl hojně užíván i pro naše území. Dnes už však víme, že dob ledových bylo podstatně více, ba co víc, ani během glaciálů nebylo klima zdaleka stabilní, což se odrazilo ve značné dynamice ledovců v čase (obr. 4). Vědecké poznatky nám odhalují, že střídání dob ledových a meziledových ovlivňovaly složité astronomické cykly a přírodní procesy.

Jedním z klíčových faktorů jsou Milankovičovy cykly, pojmenované po srbském matematikovi Milutinu Milankovičovi, který během své bohaté kariéry mimo jiné zkoumal astronomické vlivy na podnebí. Tyto cykly zahrnují změny v excentricitě (tvaru oběžné dráhy Země kolem Slunce), sklonu rotační osy Země a precesi (kolísání orientace rotační osy). Kombinace faktorů způsobuje periodické změny množství slunečního záření dopadajícího na Zemi, což vede k oscilacím mezi teplejšími a chladnějšími obdobími v průběhu kvartéru, tedy posledních 2,6 milionu let. Dalším důležitým faktorem jsou změny v koncentraci skleníkových plynů, mimo jiné oxidu uhličitého a metanu, které mají významný vliv na globální teploty. Tyto změny mohou být vyvolány jak přírodními procesy, jako jsou vulkanické erupce a biologické děje, tak v posledním interglaciálu (holocénu) rovněž lidskou činností. V průběhu ledových a meziledových dob se koncentrace výrazně měnila, což mělo za následek další variabilitu v klimatu.



Klíčovou roli hraje i cirkulace atmosféry a mořských proudů, jejichž narušení ovlivňuje lokální i globální klimatické podmínky. Např. změny v proudění v severním Atlantiku jsou často spojovány s rychlými klimatickými změnami během poslední doby ledové.

Tento komplexní systém způsobuje, že klima na Zemi podléhá mnoha různým vlivům, což vede k periodickým změnám mezi ledovými a teplejšími obdobími. V nejmladším geologickém období se tak střídají glaciály, trvající zhruba 100 tisíc let, a interglaciály, s délkou nižších desítek tisíc let, o čemž podává informace poměr různých izotopů kyslíku ve schránkách hlubokomořských dírkonošců (Foraminifera), který odráží teplotní podmínky. Jsou tak stanoveny mořské izotopové stupně odpovídající určité relativní globální teplotě. Ani tato období však nemůžeme vnímat jako klimaticky jednotvárná. Oproti glaciálům je současné interglaciální klima i se všemi anomáliemi (např. malou dobou

5 Krkonošské ledovce ve vrcholném období posledního glaciálu. Dosud není jasné, jestli byla v té době zaledněna Labská, Pančavská a Bílá louka. Rozsah karových a údolních ledovců je naopak velmi přesný díky morénám dochovaným v údolích.

6 Labský důl znázorněný současnými vrstevnicemi (bledé modře) a v období před zaledněním (červeně, obr. A). Rozdíl výšky současného a preglaciálního reliéfu (B). Příčné profily P1–P4 (C), jejichž průběh je znázorněn na obr. A i B. Je patrné, že k největšímu eroznímu účinku ledovce došlo v centrální části karu, která byla v minulosti zaplavená jezerem a kde se dnes nacházejí meandry Labe.

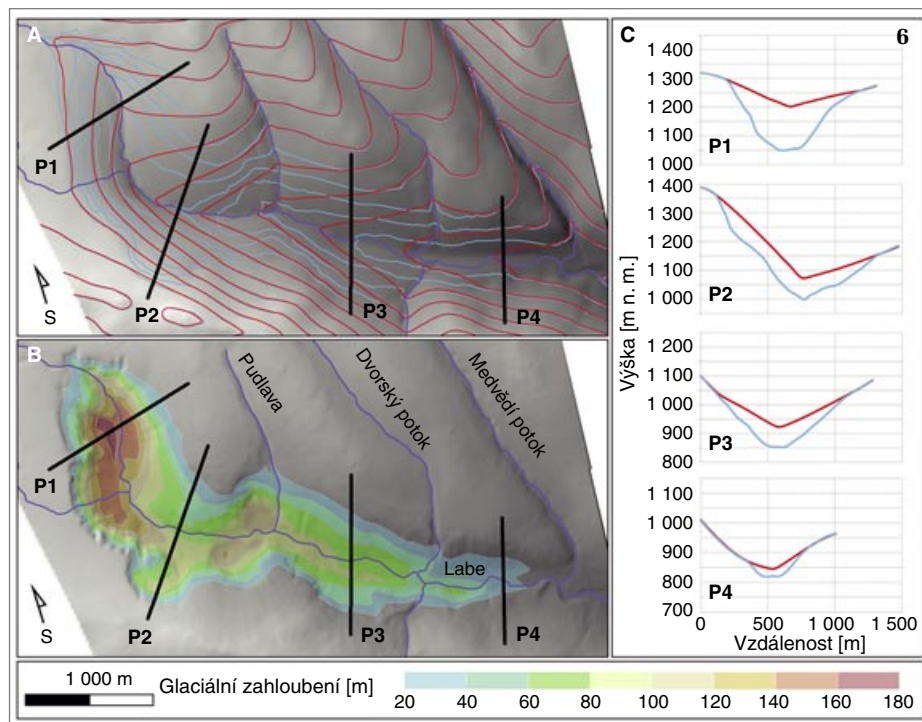
ledovou nebo současným oteplováním) velmi stabilní. Teplotní záznamy z ledovcových vrtů podávají informaci, že klima glaciálů bylo značně rozkolísané. Během posledního glaciálu jsou popsány desítky

relativně chladnějších a teplejších výkyvů (obr. 4). Podstatný vliv na světové klima má systém mořských proudů (termohalinní výměník), přičemž mořské proudy byly ochlazovány odlomenými kusy ledovců nebo v nejmladší fázi glaciálu kolapsem velkého sladkovodního jezera Agassiz v Severní Americe.

Krkonoše v glaciálech ležely v poměrně úzkém koridoru mezi Fennoskandinávským ledovcovým štítem na severu a zaledněnými Alpami na jihu. Krajina střední Evropy připomínala dnešní Subarktidu, vyskytovala se zde trvale zmrzlá půda (permafrost) a tundra. Klima bylo relativně hodně kontinentální, podstatně více než dnes. Hladina světového oceánu byla v maximech zalednění snížena o více než 100 výškových metrů, což se projevilo i na průběhu pobřežní linie, která byla v případě Atlantického oceánu posunuta zhruba o 200 km dále na západ ve srovnání s dnešním stavem. Zatímco Vogézy nebo Schwarzwald hostily relativně velké ledovcové čapky, Krkonoše byly na objem ledu podstatně chudší. To je právě dáno kontinentalitou a nižšími srážkami. Vogézy byly stále dostatečně srážkově bohaté pro vznik rozsáhlých ledovců, Krkonoše byly naopak srážkově výrazně chudší.

Rozsah

Geomorfologové se vždy zajímali o problematiku plošného rozsahu pleistocenního zalednění tohoto pohoří. J. Partsch vycházel z analogií ve světě a předpokládal, že zalednění Krkonoš bylo plošné (ledovce pokrývaly plošně jejich nejvyšší polohy), přičemž do údolí stékaly jen splazy. Názory na rozsah zalednění se však postupně vyvíjely. Podle dnešních poznatků se zde nacházelo několik izolovaných karových a údolních ledovců (obr. 5). Jak bylo zmíněno, klima v Krkonoších bylo v glaciálech velmi chudé na srážky. Proto pravděpodobně nevzniklo plošné zalednění jejich vrcholů (na rozdíl např. od Vogéz) a klíčovou roli v rozložení ledovců hrál reliéf a vítr. Nelze si nepovšimnout, že většina ledovcových karů je orientována k východu a žádný k západu. Zatímco západně orientované údolí Mumlavý ledovec nepřemodeloval, závětrné východně exponované údolí Labe již ano. Stejně jako dnes, také v glaciálech převládalo západní proudění větru, který transportoval sníh z vrcholových zarovnaných povrchů (relativně plochého reliéfu, který byl do dnešních výškových poloh tektonicky vyzdvižen) do závětrí v údolních uzávěrech, kde vznikly ledovce. Tuto úlohu větru při vzniku ledovců popsal již německý geolog Georg Berg na začátku 20. století a rovněž zmíněný A. Rathsburg. Později ji rozvinul v rámci teorie anemo-orografických systémů profesor geobotaniky Jan Jeník (1961; viz např. Živa 2022, 4: 173–176, 6: 285–287). Anemo-orografický systém se skládá z vodícího údolí (se západní orientací), které usměrňuje proudění větru, vrcholové vyfukávané plošiny a závětrného (východně orientovaného) údolí, kde dochází k ukládání sněhu a jiného materiálu unášeného větrem. Skutečnost, že se v Krkonoších mohou uplatňovat anemo-orografické systémy, je dána především geologicky. Stavba a uspořádání horské oblasti, která má nejvyšší



polohy ve formě zarovnaných povrchů, je natolik příhodná, že se zde anemo-orografické systémy uplatnily podstatně lépe než např. v Hrubém Jeseníku, kde vznikl pouze jeden ledovcový kar, Velká kotlina.

Chronologie

V období posledního glaciálního maxima (zhruba 27–19 tisíc let před současností) hostily Krkonoše několik izolovaných karových nebo údolních ledovců (obr. 5). Jejich vzniku předcházelo naopak období, kdy byly kary bez ledu (báze vrtu z Labského dolu dokládá obnažené dno před 30 tisíci let; Engel a kol. 2010). Maximální rozsah měly krkonošské ledovce před více než 21 tisíci let, poté začaly v důsledku změny klimatických podmínek ustupovat (Engel a kol. 2014). V období posledního záchvěvu glaciálu, stadiálu nazývaného jako mladší dryas, došlo opět minimálně ke vzniku malého ledovce ve Velké Sněžné jámě. Tento nejmladší ledovec je jediným dosud potvrzeným pro dané období ve střední Evropě na sever od Alp a západně od Karpat. Všechny výše zmíněné časové údaje představují výsledek moderních radiometrických nebo luminiscenčních datovacích metod aplikovaných na ledovcové nebo jiné sedimenty. Poznotek o Labském dolu bez ledu se opírá o radio-karbonové datování a datování opticky stimulovanou luminiscenci, zbylá data o fázích ústupu zalednění jsou získána metodou radionuklidu berylia ^{10}Be z balvanů na dobře zachovalých morénách. Zdá se, že toho víme o krkonošských ledovcích opravdu hodně. Hlubší poznání souvislostí však napoví, že je situace přece jen složitější. Z uvedených informací je zřejmé, že pomocí relevantních vědeckých metod máme ověřen výskyt ledovců v Krkonoších pouze v posledním glaciálu (würmu).

Existují v Krkonoších stopy starších zalednění, která byla v Alpách i v severní Evropě o něco rozsáhlejší? Nikoli přesvědčivě. J. Partsch popsal ledovcové sedimenty v centru Pece pod Sněžkou. Při stavbě hotelu Horizont v 70. letech 20. století byly rovněž odkryty sedimenty, které by se mohly vázat ke staršímu zalednění, protože centrum Pece pod Sněžkou leží několik set metrů pod nejstarší dochovanou würmskou morénou. Ani v časech Partsche, ani v 70. letech však nebylo k dispozici radiometrické datování použitelné pro určení stáří morén ani jiné pokročilé metody, které by mohly o stáří sedimentu něco napovědět. Dalším vodítkem může být reliéf erozních tvarů, které dávné ledovce vytvořily – karů a ledovcových údolí (trogů). Dobře zahluobené kary naznačují, že zde ledovce musely přetrvávat dlouhé období. Problém tkví v tom, že toto období lze jen těžko vymezit. Jak již bylo řečeno, dynamika klimatu ovlivňující rozlohu ledovců v posledním glaciálu byla vskutku obrovská. Krkonošské ledovce byly oproti velkým ledovcům Alp nebo Fennoskandinávskému ledovcovému štítu velmi malé, tudíž reagovaly na změny podstatně rychleji. Navíc, vývoj karů se vztahuje pouze do období, kdy mají ledovce tzv. teplou bázi, což znamená, že nejsou přimrzlé k podloží a posouvají se. Jaký byl souhrnný časový úhrn takových období



7 Labe meandruje na dně Labského dolu v místě, kde kdysi existovalo jezero.

8 Jezerem vyplněné dno karu Malého Rybníka (Mały Staw) na polské straně Krkonoš. Foto K. Antošová (obr. 7 a 8)

v Krkonoších, nevíme a pravděpodobně nikdy vědět nebudeme. Na jedné straně existují názory, že starší zalednění zde měla větší rozsah než zalednění poslední, podobně jako v Alpách nebo v severní Evropě. Na straně druhé existuje hypotéza, že právě dosah Fennoskandinávského ledovce do těsné blízkosti Krkonoš ve starších obdobích mohl zapříčinit minimální, nebo dokonce žádný výskyt ledovců v Krkonoších, protože obrovský ledovcový štít v blízkosti mohl vést k podstatně nižšímu úhrnu srážek. Pouze detailní výzkum dosud neprozkoumaných sedimentů a zjištění potenciálně suššího klimatu by mohly přinést odpověď na otázku, která je řešena od přelomu 19. a 20. století.

Účinek

Labe a Bílé Labe mají na svém soutoku podobnou délku toku i průměrný průtok vody. Oba toky pramení na zarovnaných vrcholových površích Krkonoš a prakticky až k soutoku sledují směr paralelní s hlavním krkonošským hřbetem a přilehlými hřbety. Vyvinuly se totiž na okraji žulového plutonu, jehož kontaktní dvůr s odolnými horninami zapříčiňuje právě tento směr. Jak jsme uvedli výše, v rámci anemo-orografických systémů má každé z těchto údolí opačnou roli. Zatímco údolí Bílého Labe slouží jako vodicí a není přemodelované ledovcem, Labský důl je naopak závětrným prostorem, kde se vyvinul ledovec. Bílé Labe má vyrovnaný podélný výškový profil toku, ale Labe nikoli. Ledovec údolí výrazně přetvořil. Porovnáním těchto profilů lze zjistit, o kolik výškových metrů prohloubil původní údolí. V karovém uzávěru Labského dolu, kde dnes meandruje Labe (obr. 7), byl ledovec mocný přes 200 m a dno původního předledovcového



údolí se nacházelo přibližně o 160 m výše. Eroze způsobená ledovcem znamenala přesun zhruba 0,2 km³ materiálu, což je úctyhodné množství (obr. 6). Pokud však porovnáme Labský důl a např. horskou oblast Cairngorms ve Skotsku nebo Skandinávské pohorí, kde byl podobný experiment rovněž proveden, dojdeme k závěru, že tamní hodnoty přehloubení předledovcového povrchu přes 500 m jsou z trochu jiné dimenze. Opět to potvrzuje, že ledovce Krkonoš byly i při svém maximálním rozsahu, co se účinku týká, nepříliš morfologicky účinné. Vtiskly však Krkonošům charakteristický krajinný ráz a podklad pro jedinečné přírodní bohatství. Stež bychom si dokázali představit Labský nebo Obří důl bez skalnatých karových stěn.

Jezera

Stejně jako v Krkonoších, také na Šumavě se ledovce podepsaly do tváře přírody a krajiny. Přestože se na Šumavě nenachází tak dokonalé ledovcové údolí, jako je např. Obří důl nebo Labský důl v Krkonoších, najdeme zde jinou přednost. Velká část šumavských karů obsahuje ledovcová jezera, kterých je dohromady osm. Krkonoše mají pouze dvě karová jezera, a sice na polské straně hor – Velký a Malý Rybník (obr. 8). Větší z nich o rozloze 8,5 ha a maximální hloubce 25 m hostí u nás vzácný druh plavuně šídlatku jezerní (*Isoetes lacustris*), menší má plochu necelé 3 ha a maximální hloubku 7 m. Jezera se postupně zazemňují a občas se do nich zřítí žulové bloky z karových stěn. Pro srovnání, na Šumavě např. Plešné jezero zaujímá 7,5 ha a dosahuje hloubky 18 m. Naproti tomu Černé jezero s rozlohou 18,5 ha má maximální hloubku téměř 40 m. Mimo karová jezera existuje v Krkonoších ještě několik ledovcových jezírek na morénách. Nejznámější jsou opět v Polsku – ve Sněžných jámách. Na české straně nalezneme pouze Mechové jezírko v údolí Kotelského potoka (obr. 9). Toto jediné ledovcové jezero v české části Krkonoš má maximální hloubku 1,5 m a plochu 460 m². Vzniklo na povrchu bazální morény ledovce Kotelních jam, pravděpodobně ve sníženině, která se vytvořila táním ledu v moréně. Svě jméno dostalo po rašelínku Dusénovu (*Sphagnum majus*), jenž lze vidět na hladině i na dně jezírka. Hladina velmi kolísá – hlavním zdrojem vody je jarní tání, naopak během letní sezony klesá na úplné minimum, a v některých letech jezírko dokonce téměř vyschlo. Datování jezerního sedimentu přineslo překvapivý výsledek: nejstarší vrstva spolehlivě náleží do období středověku, přestože by se dalo předpokládat, že bude podstatně starší. Není tak vyloučen zásah člověka v historické době, čemuž napovídá i fakt, že vedle jezírka se nacházejí základy budovy, které jsou nyní předmětem archeologického výzkumu. Výrazně starší je sediment zaniklého karového jezera v Labském dole, o němž již byla řeč v souvislosti s časovými údaji o ledovcích. Celková mocnost sedimentů dosahuje přes 15 m, ale pouze jejich část odpovídá jezerní sedimentaci. Vyskytují se v nich jezerní řasy, zejména *Pediastrum kawraiskyi*, ale rovněž třetíhorní mořské obrněnky (*Dinoflagellata*), které se sem dostaly pomocí větru během



9 Mechové jezírko v údolí Kotelského potoka je jediným dochovaným ledovcovým jezerem na české straně Krkonoš. V zimě bývá jeho hladina obvykle na maximu.

10 Pohled na Obří důl ze Sněžky umožňuje zřetelně vidět příčný profil ve tvaru písmene U (bílá křivka) i hřbet boční morény (modrá křivka). Snímky a orig.: D. Krause, pokud není uvedeno jinak

glaciálu (Engel a kol. 2010). Kromě zaniklého jezera v Labském dole najdeme v Krkonoších zaniklé jezero v Černé Sněžné jámě na polské straně hor a několik menších zaniklých jezírek na morénách. Teoreticky se mohou zanesená jezera nacházet ještě v Obřím dole, kde je ale mocná nadložní vrstva říčních sedimentů a ani geofyzikální měření zatím nepotvrdilo přítomnost jezerního sedimentu pod náplavy Úpy.

Dnešní příroda a efekt zalednění

Jak vyplývá z výše uvedeného, problematika krkonošských ledovců je velmi specifická a stále do značné míry neprobádaná. Otázkou zůstává především časové vymezení období starších zalednění, ale částečně také prostorový rozsah ledovců. Velmi dobře naopak víme, že ledovce zanechaly v krkonošské krajině výrazné stopy a do značné míry podmínily dnešní přírodní bohatství. Krkonošské kary, po-

věstné „zahrádky“ (Krkonošova, Čertova nebo Schustlerova), jsou významnými botanickými lokalitami s obrovskou biodiverzitou. Mohou za to mimo jiné sněhové laviny, které zajišťují periodickou likvidaci vysokých dřevin a udržují v karech bezlesí přímo navázané na přirozené alpské bezlesí na vrcholech. Laviny rovněž často strhávají drn a fungují jako přirozený disturbanční činitel. Nebýt ledovců a jimi vzniklých karů, nebylo by v Krkonoších tolik lavinových drah, které se vyskytují obvykle v karových stěnách, a tudíž ani tolik botanických lokalit. Pančavský vodopád v karové stěně Labského dolu, s celkovou výškou 148 m nejvyšší český vodopád, ani další vodopády v karech by rovněž neexistovaly, kdyby v Krkonoších neprobíhala ledovcová činnost. V neposlední řadě by nevznikla jezera, která jsou přírodovědecky vděčnými biotopy s výskytem vzácných druhů. Zároveň jde, spolu s rašeliníšti, o přírodní archivy, na základě nichž se dá rekonstruovat vývoj vegetace, klimatu a krajiny v nejmladší geologické historii. Ledovce sehrály pro přírodu Krkonoš naprosto zásadní a nenahraditelnou roli, kterou bychom si měli stále připomínat.

Seznam použité literatury uvádíme na webu Živy. K dalšímu čtení např. Živa 2016, 3: 110–112 a 4: 165–167.

