

Český ráj – přírodní geologická laboratoř světového významu

Jakub Mareš, Jiří Bruthans, Michal Filippi

Český ráj je z hlediska geologie mimořádně zajímavou a významnou oblastí, kde se na malé ploše koncentrují horniny různého původu a složení. Proto zde můžeme

pozorovat pískovcová skalní města, torza sopek, ale dokonce i dobře rozvinutý kras. Kromě toho se tu nalézají množství zajímavých a krásných minerálů.



Obr. 1: Střelečský uzamčený písek v lomu (vlevo) a na přirozených výchozech ve skalním městě Apolena (vpravo). Foto Michal Filippi

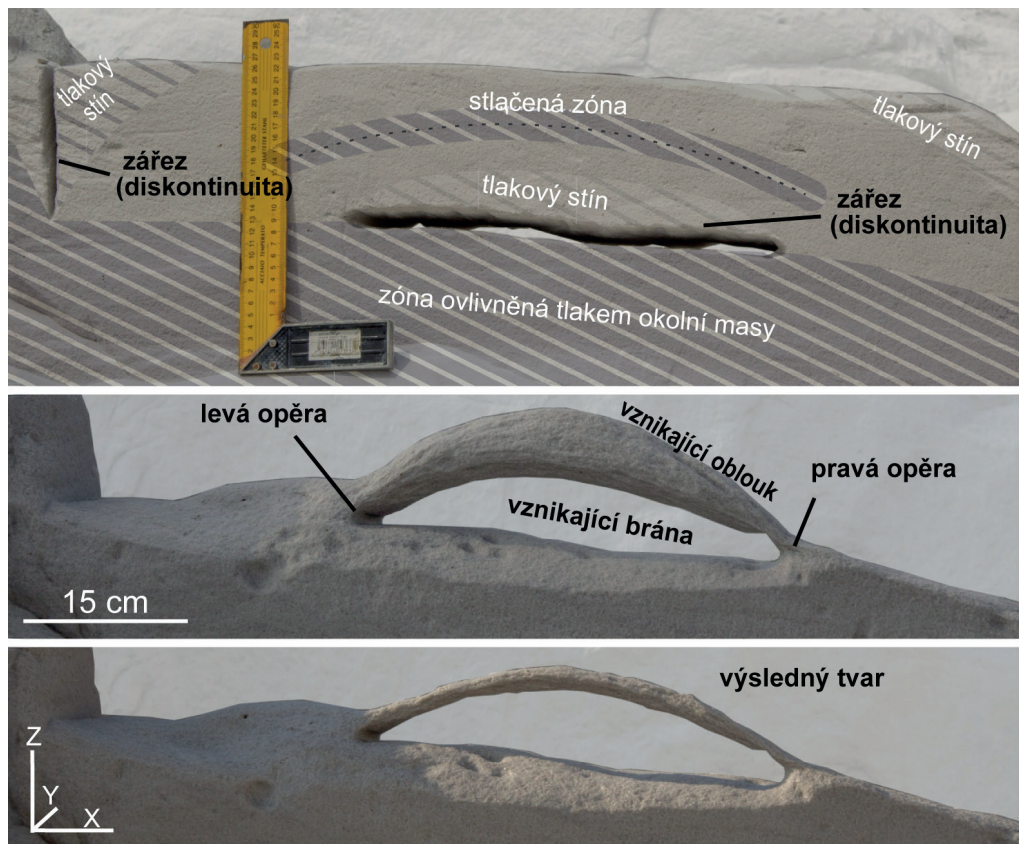
Díky své výjimečné geologické rozmanitosti byl Český ráj v roce 2005 zařazen mezi evropské geoparky a od roku 2015 je zařazen do mezinárodní sítě globálních geoparků UNESCO (unesco.org/en/igpp/geoparks). Na relativně malé ploše tu najdeme více než 200 geologických a mineralogických lokalit (geoparkceskyraj.cz). Slavný cestovatel a přírodovědec Alexander Humboldt dokonce údajně označil vrch Trosky se zříceninou hradu za osmý div světa.

Geologická stavba území

Geologická stavba Českého ráje je výsledkem složité interakce sedimentačních, vulkanických a tektonických procesů, které tuto oblast utvářely od permokarbonu do současnosti. Během permokarbonu se v prostředí říčních systémů, jezer a aluviálních kuželů ukládaly mocné série pískovců, slepenců a jílovců. V některých sedimentech lze nalézat karbonátová mineralizovaná (konkrétně zkřemenělá) dřeva – araukarity, kterými je proslulé hlavně okolí Nové a Staré Paky a Trutnovsko.

Permokarbonské sedimenty jsou doprovázeny produkty intenzivního vulkanismu, který se projevoval výlevy bazaltických až andezitových láv, dnes běžně označovaných jako melafry. V dutinách těchto vulkanitů nacházíme na mnoha lokalitách nejrůznější křemenné hmoty – zejména acháty, jaspisy a ametysty, ale také karbonáty nebo zeolity. Ty nejproduktivnější lokality byly, nebo stále jsou, známé mineralogům a sběratelům nejen u nás, ale i ve světě. Patří mezi ně například Kozákov, Doubravice, Morcinov, Peřimov a mnohé další.

Další etapa sedimentace započala ve svrchní křídě před zhruba 100 miliony lety. Sedimentovaly zde především křemenné písky (později zpevněné do pískovců) ukládané v období cenomanu až coniacu v mělkém epikontinentálním moři, které v té době pokrývalo většinu Čech. Zdroj materiálu se nacházel v okolí dnešního Liberce až Žitavy (tzv. Lužický ostrov) a do moře byl dopravován sítí řek. Hrubozrnnější materiál (pro vznik pískovců) byl ukládán v deltách těchto řek v prostředí podobném mořskému pláží. Jemnozrnnější materiál putoval dále do moře, kde se následně usazoval a později se z něj vytvořily slínovce a jílovce. S tímto materiálem se můžeme setkat zejména v Polabí. Mořská hladina v křídě nebyla konstantní, ale občas docházelo k výzdvihu hladiny, tzv. transgresi, následované usazováním jemnozrnných sedimentů. To vedlo k tomu, že se i v převážně



Obr. 2: Vznik skalní brány v pískovcovém bloku in situ – brána vznikne pouze v důsledku uměle vytvořeného zářezu a opakovaného zalévání vodou (tj. simulací eroze). Autor Jaroslav Řihošek

pískovcových oblastech Českého ráje nacházejí vrstvy jílovců (Uličný *et al.* 2009).

Po ústupu křídového moře začaly pískovcové plošiny podléhat intenzivní erozi. Tektonické pohyby, související s alpským vrásněním, rozčlenily zpevněný sedimentární komplex do ker a bloků, které se zdvihaly a poklesávaly. Tato tektonická predispozice určovala orientaci puklinových systémů, podél nichž se následně rozvíjela selektivní eroze. Výsledkem je vznik charakteristických geomorfologických forem – skalních měst, izolovaných skalních věží a úzkých soutěsek, které dnes tvoří jádro Prachovských skal, Hruboskalska či Příhrazských skal (Adamovič *et al.* 2006).

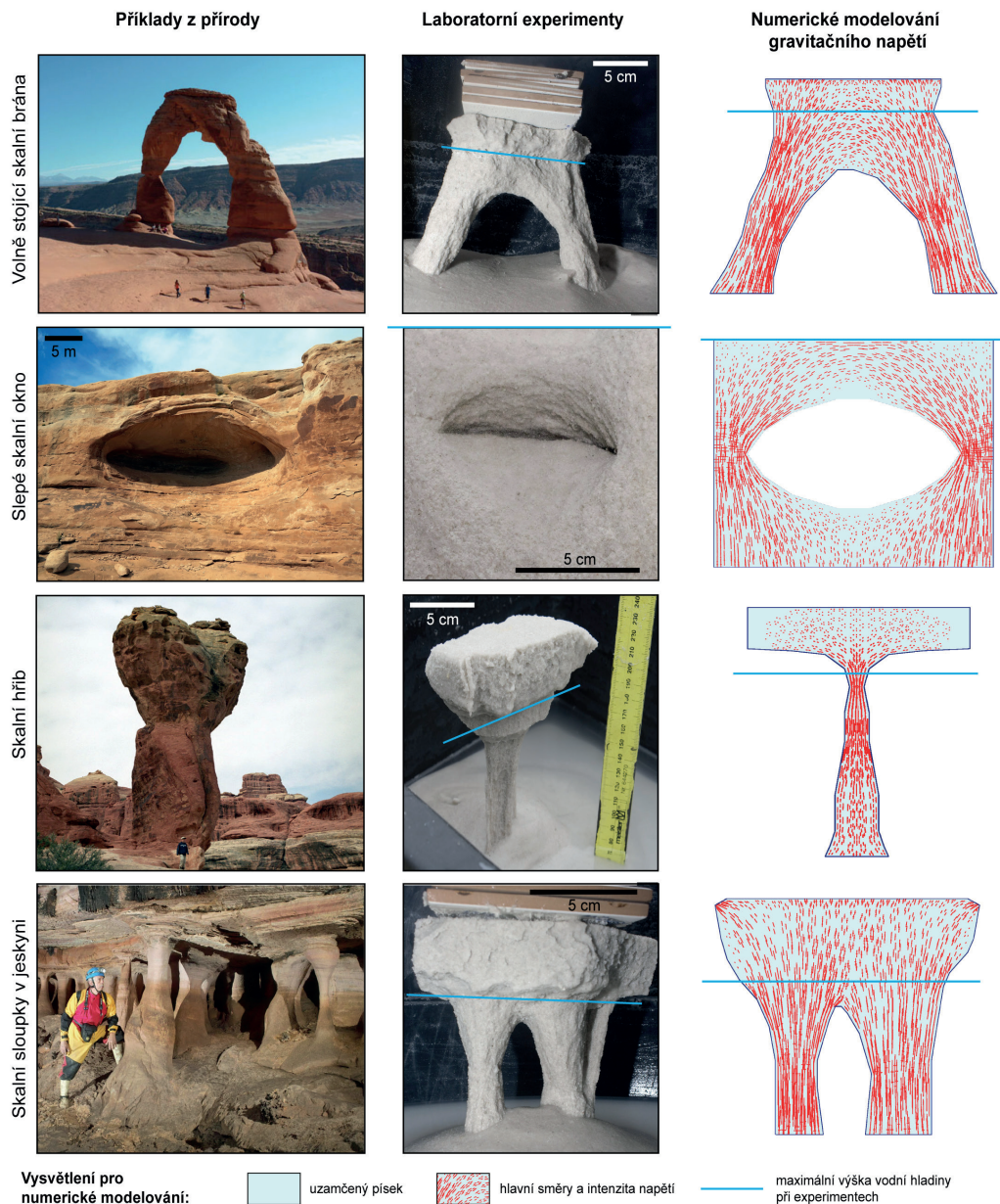
Významnou kapitolu geologického vývoje oblasti Českého ráje představuje neovulkanismus třetihor. V období miocénu (před 5–23 miliony lety) došlo k pronikání bazaltových a nefelinitových magmat, která prorážela křídový sedimentární komplex a vytvářela sopouchy, lávové proudy a pyroklastické uloženiny. Nejvýraznějším dokladem této činnosti jsou Trosky, jež představují erozí vypreparované přírodní kanály třetihorní sopky. Menší vulkanické intruze jako Vyskeř

či Zebín dokládají, že vulkanická aktivita byla v regionu velmi rozšířená a měla zásadní vliv na výsledný reliéf (Rapprich *et al.* 2007).

Z nesčetného množství geologických fenoménů byly vybrány dva, které proslavují Český ráj po celém světě, a nakonec je popsán i fenomén, který by většina lidí v Českém ráji ani nečekala – dobře rozvinutý kras.

Střelečský uzamčený písek – klíč k pochopení vzniku nejdokonalejších pískovcových útvarů na Zemi

Významnou část Českého ráje tvoří hruboskalský kvádrový pískovec, což je mělkovodní sediment křídového moře, který je tvořen z drtivé většiny křemenem s malou příměsí kaolinitu. V okolí obce Troskovice se nachází speciální typ tohoto pískovce. Jedná se o velmi rozpadavý bílý „pískovec“, který se těží pro výrobu skla v lomu Sklopísk Střeleč. V přirozené podobě se nachází ve skalním městě Apolena (Obr. 1).



Obr. 3: Ukázky různých pískovcových skalních útvarů v přírodě (vlevo), při experimentu se střelečským uzamčeným pískem (uprostřed) a jako výsledek matematického modelu, kde modrá linie je hladina zaplavení a červené linie ukazují směr a jejich hustota intenzitu horninového tlaku. Převzato z Bruthanse *et al.* (2014).

Přestože tvoří skály, nejde vždy o pískovec, ale o tzv. „uzamčený písek“. Zjednodušeně řečeno, pískovec se od písku liší hlavně tím, že má tmel, který slepuje písková zrna k sobě. Uzamčený písek tmel nemá, a proto vykazuje až neuvěřitelné vlastnosti. Je natolik měkký, že se rozplavuje prudce proudící vodou z hasičské proudnice, a dříve se tak i ve střelečském lomu těžil. Je ale natolik pevný v tlaku, že ho nelze těžít bagry a jeho struktura se musí nejprve rozrušit odstřely, teprve pak se stane těžitelným. A to je postup, který se dnes v lomu používá. Deseticentimetrová kostka toho pískovce

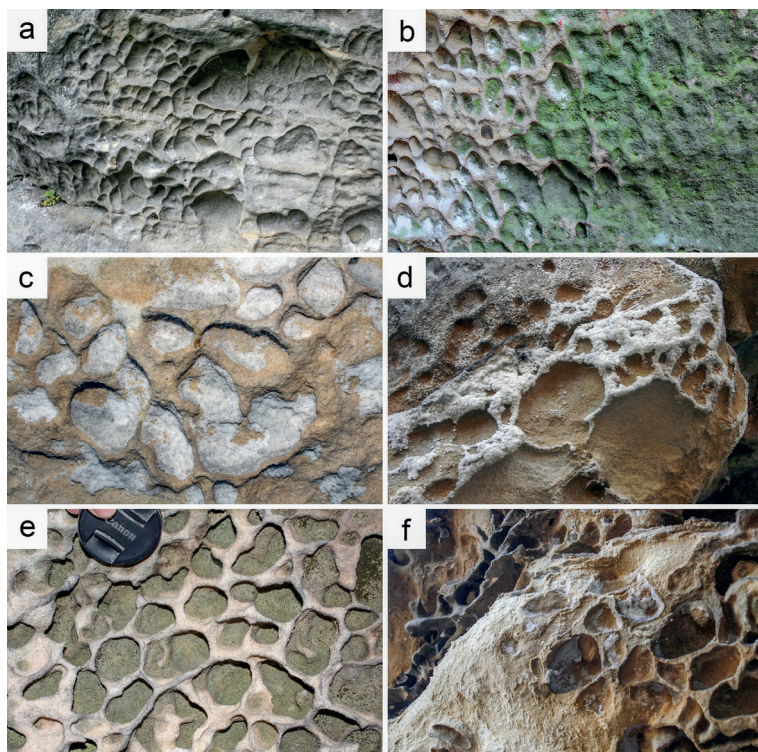
unese auto, ale ta samá kostka se samovolně rozpadne ve stojaté vodě (viz demonstrace v dokumentu ČT *Brány*). Kombinace těchto vlastností se zdá být nemožná, ale příroda je ta zdaleka nejmocnější čarodějka a člověk je jen její věčně udivený učeň.

Důvodem podivného chování střelečského „uzamčeného písku“ je jeho struktura. Zrna do sebe velmi dobře zapadají, a zdejší pískovec se proto chová jako suché zdivo z miniaturních kvádrů. V tlaku je uzamčený písek pevný jako běžný pískovec, protože při stlačení se

křemenná zrna zapřou do sebe a neusmýknou se. Může tak tvořit vysoké skalní věže. Proto je nutné ho v lomu rozrušovat trhavinou. V tlaku je to tedy skála, ne písek. V tahu ale žádnou pevnost nemá. Je pouhým pískem. Není zde žádný tmel, který by lepil jedno zrno ke druhému. Jde ho tahem strhnout jako suché zdivo. Rozpad ve stojaté vodě způsobuje slaboučký tlak kapilární vody, která se žene do pórů pískovce, vyhání přítomný vzduch, který pak „tlačí zevnitř“ a rozrušuje pískovec na jednotlivá zrna.

Ale to největší kouzlo střelečského uzamčeného písku teprve přijde. Lze z něj, aniž by se ho člověk dotknul, vytvořit všechny dokonalé skalní útvary známé z pískovců celého světa. Dají se z něj vytvořit skalní brány tak tenké a elegantní, jako jsou ty nejhezčí skalní brány z věhlasného národního parku Arches v Utahu v USA (**Obr. 2**). Dají se z něj vytvořit arkády, převisy, slupky i dokonalé skalní hříby stojící na neuvěřitelně tenké noze. O těchto útvarech se donedávna netušilo, jak vznikají. A přitom jsou v národních parcích obdivovány turisty po celém světě, a dokonce se často jako kulisy objevují v hollywoodských filmech. Jak vůbec mohou vznikat tak pěkné brány a perfektně vyvážené skalní hříby? Jak je slepě či náhodně působící eroze vůbec mohla vytvořit? Byl to právě střelečský uzamčený písek, který dal šokující odpověď.

Tyto útvary totiž nevytvořila pouze „bezduchá“ eroze. Nejsou dílem náhody. Naopak. Cosi erozi skal evidentně řídí a diriguje. Proto jsou útvary tak elegantní, není na nich žádný balast, skalní brány jsou hladké a vše, co nepřenáší váhu, zmizelo, zůstal jen dokonalý oblouk. Kdo nebo co je tím dirigentem? Experimenty ukázaly, že to není žádná nadpřirozená bytost. Dirigentem je gravitační vyvolaný tlak v hornině. Jednotlivá zrna na sebe tlačí a tlak provazuje miliardy zrn do jediného interagujícího „organismu“ – skalního útvaru. Cokoli se v jedné části útvaru stane, odrazí se i ve zbytku. V částech, kde je horninový tlak velký, eroze neúčinkuje nebo postupuje pomalu. Je to stejně marné jako vytahovat knihu ze spodní části obrovského sloupce knih. Nejde to. Naopak ty části útvaru, které tlak nepřenáší, se erodují snadno, stejně jako je snadné vytáhnout knihu, na které leží jen několik málo knih. Ačkoli pískovec je jen neživá hornina, vlastně se chová chytře a úsporně: nechává erozi odnášet ty části, co nenesou žádnou váhu (balast), čímž se připravují nosné prvky (oblouky, sloupky apod.). Tím se skála (skalní forma) stává stabilnější. Ze střelečského



Obr. 4: Různé tvary a velikosti voštin z lokalit Drábovna a Mladějov. Viditelné jsou jak srážející se soli (bílé vrstvy na obr. b, c, d), tak lišejníky v místech, kde se soli již nesrážejí (zelené plochy na obr. b, e) (převzato z Bruthanse *et al.*, 2018).

Foto Michal Filippi

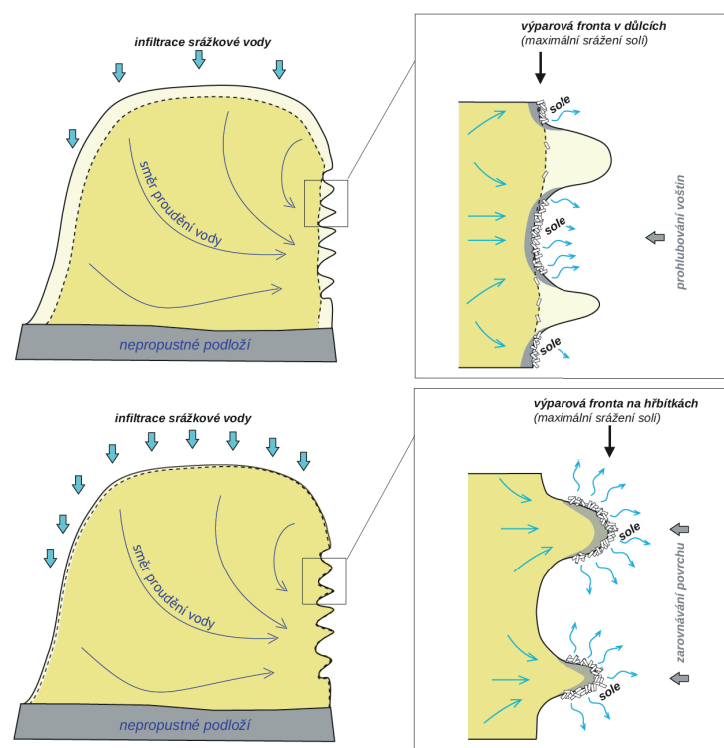
uzamčeného písku se pouhým namáčením ve vodě či kropením vodou podařilo vytvořit všechny hlavní útvary známé z pískovcových národních parků (**Obr. 3**). Tyto útvary vznikají samy od sebe, vynořují se postupně, jak voda odnáší zrna písku. Co trvá v přírodě statisíce let a člověk to nemůže pozorovat, vytváří se ze střeleckého uzamčeného písku během pár hodin. Díky střeleckému uzamčenému písku můžeme při experimentech ve zrychlené podobě pozorovat fascinující vývoj od ošklivých hranatých tvarů k dokonalosti zmenšených skalních forem. Více informací o vzniku těchto skalních útvarů je v těchto článkách: Bruthans *et al.* 2014, Bruthans 2014, Filippi 2014, Řihošek *et al.* 2019, Filippi *et al.* 2021.

Jak vznikají voštiny? Důkaz poskytl Český ráj

Jamkovité až dutinové (tzv. kavernózní) zvětrávání je celosvětově rozšířený způsob formování pískovcových skalních stěn. Toto zvětrávání probíhá na Zemi ve všech klimatických pásmech, od polárních oblastí přes humidní, aridní až po ty přímořské, a najdeme je dokonce i na Marsu. Přesto byl důvod

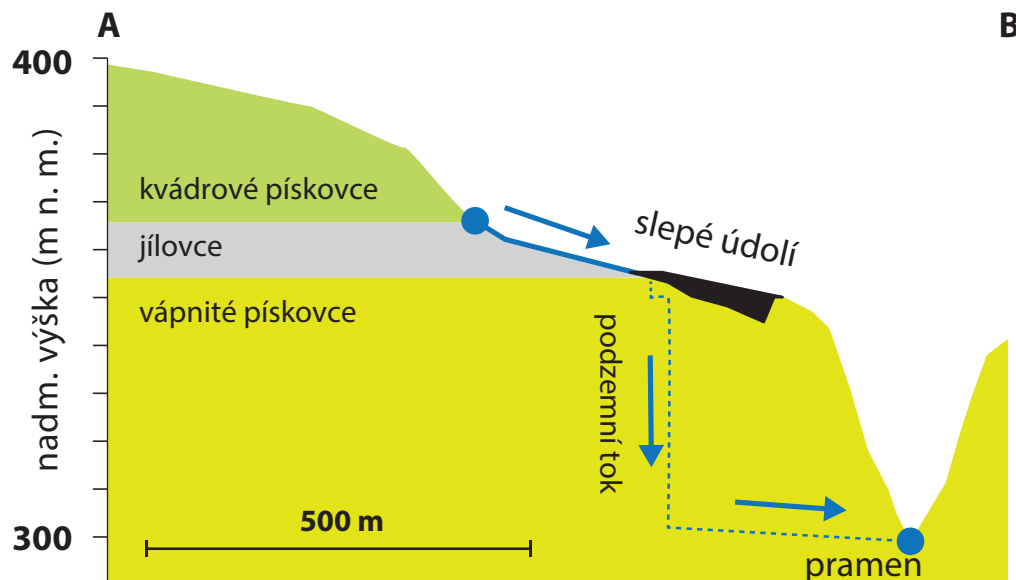
tohoto typu zvětrávání dlouhou dobu záhadou. Nejběžnějšími produkty kavernózního zvětrávání jsou formy nazývané voštiny a tafoni. Voštiny jsou drobné dutiny do 10 cm, které se vyskytují v početných shlucích. Tafoni (jednotné číslo tafone) jsou spíše větší dutiny různých tvarů, velikostně často přes 1 m, které jsou většinou relativně izolované. Vědělo se, že dutiny různých velikostí a tvarů souvisí se solným zvětráváním. Proč ale ve zjevně stejnorodé hornině lokálně tyto prohlubně vznikají? Proč se prohlubňují, když povrch okolo nich nezvětrává? Sto let výzkumů nepřineslo odpověď. Někdo se domníval, že skála v okolí prohlubně je zpevněná. Měření ale ukázala, že tomu tak ve skutečnosti není.

Někteří se domnívali, že dutiny vytvářejí písečné víry, jiní zase věřili, že živé organismy. Nakonec spíše geologové tak trochu rezignovali a označili proces vzniku dutin za „selektivní erozi“, aniž by někdo doložil, co tedy erozi selektuje na rychlou a pomalou. Záhadu prolomili až nizozemští fyzici, kteří na základě matematického modelování pohybu vlhkosti v hornině nabídli elegantní řešení. Když je skála hodně vlhká (porézní horniny obsahují značné množství vody s rozpuštěnými solemi)



Obr. 5: Schéma vzniku voštin (nahore) a zarovnávání povrchu při přílišném množství vody (dole) (převzato z Bruthanse *et al.*, 2018, (upraveno).

nebo je často dotována vodou z venku, je i povrch skály mokrá všude a pórová voda se solemi se nejvíce vypařuje na výstupcích. Krystalizující soli tedy hřebítky nejvíce ničí a výsledkem je vyhlazující se skála bez výstupků i prohlubní. Když je ale skála dotována malým množstvím vody, její povrch rychle vyschne a voda z nitra skály proudí jen do prohlubně a vypařuje se právě tam. Krystalizace soli se tak soustředí na prohlubně a tím dochází k jejich rozšiřování a prohlubňování. Už nedosáhne na výčnělky, které přežívají netknuté a tvoří oblé lemy dutin. Geniálně jednoduché. Ale jde jen o matematický model. Opravdu se tak kapilární voda ve skále chová? Důkazy z reálného pískovce přinesly experimenty a měření prováděné opět na pískovcích s voštinami v oblasti Českého ráje, konkrétně v okolí Mladějova u lomu Střeleč. Kapilární voda je pouhým okem neviditelná. K jejímu zviditelnění byl použit fluoresceinový prach. Ten když je suchý, má červenou barvu, ale ve vlhku zežloutne a nakonec zezelená. Kde není kapilární voda, bude skála červená, kde je kapilární voda, skála zežloutne či zezelená. Řezy voštinami obarvené vodou s fluoresceinem ukázaly, že kapilární voda je přesně tam, kde ji matematický model nizozemských



Obr. 6: Geologický řez krasovou oblastí u Turnova (převzato z Kůrková *et al.*, 2019, upraveno).

fyziků předvídal. Kapilární voda dosahuje na dna voštin, kde se z ní při výparu ukládá sůl, která zde způsobuje solné zvětrávání, zatímco hřbítky jsou suché, a nejsou tedy vystaveny zvětrání (Obr. 5).

Podobně jako ve výše popsáných případech skalních forem, nejsou voštiny náhodné útvary a nevznikají bezduchou erozí.

Přestože již v současné době víme, jak kavernózní zvětrávací formy vznikají, pořád není jasné, proč na některých lokalitách vznikají voštiny a jinde tafoni. Pravděpodobně to bude souviset s hydraulickými vlastnostmi dané horniny a dostupností vody. Experimenty na toto téma neustále probíhají na voštinách v Českém ráji. Více o vzniku voštin je popsáno v odborných článcích (Huinink *et al.* 2004, Bruthans *et al.* 2018, Weiss 2019, Weiss *et al.* 2020).

Turnovský kras

Podloží kvádrových pískovců Českého ráje tvoří jemnozrnné vápnné pískovce jizerského souvrství. Tyto horniny s nepravidelným rozpadem se na první pohled liší od kvádrových pískovců tvořících skalní města. Rozdílné je i minerální složení, jelikož podložní pískovce mají významnou vápnnou příměs. Jedná se o střídání tenkých poloh vápnných pískovců a písčitých vápenců. Vápnné komponenty se snadno rozpouštějí, a pokud je pískovec obsahuje v dostatečném množství, po jejich

rozpuštění už křemenná zrna nejsou schopna držet pohromadě a mohou být vyplavena. Tím dojde ke vzniku trubicovitých dutin, nebo dokonce menších jeskyní s velkou propustností pro podzemní vodu, mnohem větší, než má nadložní kvádrový pískovec. Vznikne tak v podstatě určitá obdoba vápencového krasu.

V oblasti mezi Jenišovicemi a Drábovnou je krasový reliéf velmi dobře vyvinut. Nacházejí se zde charakteristické krasové prvky, jako jsou závrtý, slepá i poloslepá údolí, ponory i jeskyně protékané podzemními toky. Hojnost krasových jevů je dána místní geologickou situací. Srážková voda se infiltruje do dobře propustných kvádrových pískovců na maloskalské Drábovně. V sestupu dolů jí brání asi 10 m mocná vrstva nepropustných jílovců v podloží kvádrových pískovců, která je pro vodu nepropustná. Proto voda z kvádrových pískovců vyvěrá na povrch ve formě pramenů, které jsou např. na Drábovně částečně jímány pro turnovský vodovod. Voda z pramenů teče po povrchu po jílovcích, až se dostane na vápnné pískovce. Tato voda má velmi nízkou mineralizaci, a proto dochází k intenzivnímu rozpouštění vápnné složky a tvorbě závrtů a ponorů, ve kterých voda mizí pod povrch, protéká jeskyněmi a objevuje se v často mohutných pramenech, jako je např. Bartošova pec.

Krasové oblasti s koncentrovanými ponory jsou velmi náchylné ke kontaminaci, protože

voda v nich proudí jeskyněmi i neprůleznými dutinami rychlostí podobnou jako v povrchové říční síti (Worthington a Ford 2009). Z tohoto důvodu je nutné znát směry a rychlosti proudění podzemní vody. K tomu se používají stopovací zkoušky, při kterých se obarví ponorný tok a sleduje se přítomnost barviva v pramenech. V okolí Turnova byly provedeny desítky stopovacích zkoušek, které potvrdily, že voda proudí podobnou rychlostí jako v Moravském krasu – tj. několik kilometrů za den. Je pozoruhodné a překvapivé, že Turnovský kras je, co se týče pestrosti krasových forem, nejlépe vyvinutým krasem v Čechách.

Geologická laboratoř

Pískovcový fenomén Českého ráje je unikátní a zahrnuje pestrou škálu procesů vedoucích ke vzniku mnoha známých zvětrávacích forem, jejichž vývoj byl donedávna do jisté míry opředen tajemstvím. Jde především o skalní brány, arkády, sloupky nebo voštiny. Zdejší „přírodní laboratoř“ nabízející jak nesčetné přírodní výchozy, tak těžené i opuštěné lomy, umožnila detailní studium těchto forem a pomohla dopodrobna objasnit jejich vznik.

Kras v okolí Turnova zase naznačuje, že i v jiných oblastech České křídové pánve, kde se vyskytují vápnné pískovce, může docházet ke vzniku krasových kanálů, čímž by se jednalo o největší krasovou oblast u nás. Prezentační výše popsáných objevů jak v české, tak především ve světové odborné literatuře došlo k významnému posunu znalostí v oboru studia pískovcových oblastí a tím i k potvrzení významu a věhlasu Českého ráje. ■

Poděkování

Výzkum vzniku pískovcových forem ve Střelečském lomu byl umožněn díky ochotě Lukáše Horáka a společnosti Sklopísek Střeleč, a.s. Děkujeme i všem spolupracovníkům, kteří se na výzkumech podíleli a samozřejmě děkujeme i Grantové agentuře ČR za podporu vědeckých projektů (aktuálně projekt č. 24-12696S).

Seznam literatury najdete na www.casopis.ochranaprirody.cz