

Studie transportu štěrku v říčním toku s využitím metalurgické strusky jako stopovače: přínos pro poznání fluviální redistribuce vltavínů

A study of gravel transport paths in a stream using metallurgical slag as a tracer:
a contribution to the understanding of fluvial moldavite redistribution

KAREL ŽÁK

Geologický ústav AV ČR, v. v. i., Rozvojová 269, 165 00 Praha 6

ŽÁK K. (2009): Studie transportu štěrku v říčním toku s využitím metalurgické strusky jako stopovače: přínos pro poznání fluviální redistribuce vltavínů. - *Bull. mineral.-petrol. Odd. Nár. Muz. (Praha)* 17/1, 79-90. ISSN: 1211-0329.

Abstract

Fluvial transport of gravel was studied using pebble size analysis and pebble lithology in the channel of the Berounka River, Czech Republic. Fluvial transport of pebbles of metallurgical slag in the gravels is discussed as a possible indirect analog to the redistribution of moldavites from their original strewn fields by fluvial processes.

A 70 km long river reach, between 74.2 and 4.5 km above the confluence of the Berounka River with the Vltava River, was studied using 5 gravel samples collected from fresh gravel bars formed in the river channel after the major 2002 flood. The studied river reach is characterized by a moderate gradient ($0.8 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$), average flow of $36.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Beroun gauge) and peak recorded flow close to $3,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, during the 1872 flood. Typical size of the largest pebbles forming the gravel bars in the channel is slightly above 100 mm (the pebble longest axis). Samples (weight 55.41 to 60.02 kg) contained 675 to 1187 pebbles above 16 mm in size, of which 100 largest pebbles in each sample were determined petrographically. Pebbles of metallurgical slag were separated and studied from the whole fraction above 16 mm.

Pebble lithology largely reflects local rock sources in the river basin. The longest transport of pebbles on the order of tens of kilometers was found for several types of SiO_2 -rich rocks, like vein quartz, Neoproterozoic silicites, Ordovician quartzites, and Cambrian quartz conglomerates. With respect to numerous steep-sloped inflows into the Berounka River, no obvious downstream gravel size fining was observed along the river path.

Metallurgical slag was introduced in the river especially after the major flood of 1872, when iron works located near the river were destroyed. After 137 years of fluvial redistribution (with several subsequent major floods) the metallurgical slag represents 8.78 wt. % of the $> 16 \text{ mm}$ pebble fraction at a site located 1 km below the former iron works, while samples collected 17 and 34 km downstream contained 1.12 and 0.11 wt. % of the slag.

Based on these data, and on discussion of other observations and data from literature, fluvial transport of moldavites along river bottoms is interpreted as improbable for distances longer than several tens of kilometers. Nevertheless, individual moldavites can be transported over longer distances, either incorporated in floating ice, or with floating trees during flood events.

Key words: *fluvial transport, gravel, Berounka River, moldavite, central Bohemia*

Úvod

Otázka redistribuce vltavínů fluviálními procesy, tedy přenosu vltavínů z primárních pádových polí vodními toky do sekundárních akumulací, dosud není úplně vyřešena. Problematická je zejména interpretace ojedinělých nálezů mimo hlavní nálezové oblasti, tedy například vltavínů z Kobyliš (Žebera 1972), nálezů u obce Skryje na Křivoklátsku (Čílek 1996) nebo u Jevíněvsí nedaleko Kralup nad Vltavou (Žák et al. 1999; Bouška et al. 1999). Neúplně vyjasněna zůstává otázka, nakolik hmotnost jednotlivých vltavínů a četnost jejich zastoupení v sedimentech vodního toku klesá během fluviálního transportu.

Většina vltavínů je ve velikosti drobných (2 až 16 mm) nebo středních (16 až 64 mm) valounů a v tocích se tedy pohybují stejnými mechanismy jako drobný až střední štěrk. Transport štěrku vodními toky probíhá zejména trakcí (sunutím či válením) nebo saltací (poskokem) po dně toku. Objemová hmotnost vltavínů ($2.30 - 2.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

je přitom mírně nižší než objemová hmotnost valounů běžných typů hornin i křemenných valounů. To je jeden z důvodů, proč vltaviny představují v sedimentu zpravidla největší velikostní frakci. Ojediněle může docházet k transportu valounů (a tedy i vltavínů) na velké vzdálenosti v ledových krách nebo v kořenech stromů unášených vodou při povodních.

Problematickou transportu vltavínů ve vodních tocích lze částečně osvětlit studiem fluviální redistribuce umělých nepřímých analogů vltavínového skla, tedy zejména různých typů umělého skla nebo hutnických strusek. Časové měřítko redistribuce těchto umělých analogů vltavínového skla je ovšem nesouměřitelné s časem, který byl k dispozici pro fluviální transport vltavínů. U vltavínů je třeba brát v úvahu i resedimentaci, tedy jejich erozní mobilizaci z jednoho typu sedimentu, fluviální přenos a sedimentaci v novém typu sedimentu a později opětovný transport.

Analogie je ovšem nepřímá, neboť u strusek a umělých skel se obvykle jedná o bodový zdroj, zatímco u vltavínů

vinů o rozsáhlý zdroj plošný. Navíc mechanické vlastnosti vltavinů se budou jak od valounů sklovitých strusek, tak i od úlomků umělého skla velmi lišit. Pro strusky i pro fragmenty umělého skla lze předpokládat poměrně pomalé chladnutí, tedy menší vnitřní pnutí, než u vltavinů, které chladly extrémně rychle. Pnutí skla vltavinů měřil již Hammond (1950) a zjistil velmi vysoké hodnoty pnutí, nedaleko hranice, kde mechanické poškození povrchu může vést k samovolné dezintegraci skla. Právě pnutí skla je důležité pro vlastnosti vltavinů během transportu ve vodním prostředí. Obecně lze tedy srovnávat chování vltavinů s nepřímými analogy jako je sklovitá struska nebo úlomky skla jen obtížně a destrukce vltavinů během vodního transportu bude zřejmě oproti těmto analogům rychlejší.

Důležitým faktorem pro odhad možné vzdálenosti transportu vltavinů je samozřejmě i počáteční velikost vltavinů a jejich tvar. Masivnější tvary a větší kusy vltavinů mohou být abrazí v první fázi transportu zbaveny povrchových vrstev s největším vnitřním pnutím a pro jejich vnitřní části (nebo úlomky velkých kusů bez pnutí) by analogie s umělým sklem nebo s umělou sklovitou struskou měla být lépe použitelná.

První studie fluvialní redistribuce umělých sklovitých hmot byla provedena členy Klubu mladých astronomů veřejné astronomické observatoře v Českých Budějovicích, kteří sledovali snižování hmotnosti fragmentů skla během jeho transportu v povrchovém toku proudící vodou (Cířka et al. 1971). Úlomky skla ze staré sklářské hutě se dostaly do toku říčky Černé v Novohradských horách více než 100 let před realizací studie a byly fluvialními procesy rozvečeny Černou dále do řeky Malše, a tou až do Českých Budějovic. Opracované valouny skla byly v této studii sledovány v 40 km dlouhém úseku těchto toků. Tvrdost umělého skla byla mírně nižší než je tvrdost skla moldavitů. Na 40 km dlouhém úseku toku poklesla průměrná hmotnost valounů skla z 8.83 g na 0.10 g. Hmotnost valounů skla tedy klesla v poměru 1 : 88. Závěry ovšem nebyly podepřeny dostatečnou diskusí problematiky fluvialního transportu (menší klasty se pohybují rychleji a dále a jejich opracování je pomalejší, viz tzv. Sternerův zákon níže). Studie Cířky et al. (1971) však přesto naznačila, že vltaviny se ve větším počtu nemohou transportovat fluvialními procesy na velké vzdálenosti. Bouška et al. (1968) na základě studia velikostní distribuce 15 576 moldavitů z 21 lokalit v Čechách a na Moravě dospěli k závěru, že vltaviny nemohly být transportovány vodou dále, než na vzdálenost několika kilometrů. Podle těchto autorů není dnešní regionální velikostní distribuce důsledkem různě dlouhého transportu a tedy různě velkého opracování vltavinů, ale spíše výsledkem původní velikostní distribuce v pádovém poli. K závěru nepřilíš dlouhého transportu vltavinů ve vodních tocích, zřejmě ne více než na 10 km, se kloní i O'Keefe (1976, str. 29).

Fluvialnímu transportu a depozici štěrku a písku v českých řekách začala být věnována větší pozornost po srpnových povodních roku 2002, kdy v korytech některých vodních toků vznikla objemná tělesa štěrku (většinou charakteru podélných valů nebo plochých lavic v korytě), která byla potom mnohde nákladně odstraňována. Ve vodohospodářské praxi se tyto sedimenty označují jako splaveniny. Otázka odstraňování akumulací štěrku v korytech řek nebo jejich ponechání na místě vyvolala značnou odbornou i laickou diskusi. Nejvíce těchto diskusí se týkalo řeky Berounky, zejména úseku, kde prochází CHKO Český kras. Režim transportu a sedimentace štěrku a

písku řeky Berounky byl následně posuzován technicky a vodohospodářsky zaměřenou studií Katedry hydrauliky a hydrologie Fakulty stavební ČVUT (Havlík et al. 2005a, b). V rámci této studie byla získána i orientační data o petrografickém složení štěrku Berounky v úseku mezi říčními kilometry (dále ř. km) 74.2 a 4.5, včetně dat o zastoupení, objemové hmotnosti a velikosti valounů železářské strusky (Žák 2005).

Hutnická struska se do fluvialních štěrku v korytě řeky Berounky dostala v největší míře při povodni dne 25. 5. 1872, kdy byly Habrovým potokem a Berounekou zničeny železářny v Nové Huti (dnes součást obce Nižbor) a Berounekou zasaženy železářny ve Staré Huti (dnes součást Hýskova). Vstup strusky do říčního toku erozí struskových hald byl natolik masivní, že ve vzdálenosti 1 km pod bývalou Starou Huti představuje struska dodnes zhruba 9 obj. % štěrku na dně říčního koryta. Struska se do štěrku řeky Berounky ovšem mohla dostávat již i dříve, neboť železářny ve Staré Huti jsou písemně doloženy od počátku 15. století (od 1607 v provozu vysoká pec) a železářny v Nové Huti byly založeny v roce 1512. Ve Staré Huti byla vysokopeční výroba ukončena před rokem 1815 (dále pokračovaly pudlovný a válcovný) a v Nové Huti byla hutní výroba ukončena v roce 1876 (Kořan 1947). Hrubě lze odhadnout, že hmotnost strusky erodované v těchto dvou železářských podnicích při povodních byla nejméně v řádu desítek tisíc tun.

Povodeň roku 1872 byla historicky největší zaznamenanou povodní na Berounce. Výška její hladiny nebyla překonána ani v srpnu roku 2002 (Žák, Elleder 2007). Redistribuce strusky ve vodním toku, kde od povodně roku 1872 proběhla řada dalších velkých povodní (přehled povodní viz Žák, Elleder 2007), může proto posloužit pro úvahy o redistribuci vltavinů vodními toky.

Současné jezy na Berounce nepředstavují pro transport štěrku za velkých povodní žádnou překážku. Prostory zdrží nad jezy jsou již z velké míry zaneseny sedimenty a štěrky se běžně pohybují i přes hrany jezů. Dokladem toho je skutečnost, že velké akumulace štěrku vznikly při povodni roku 2002 právě v úsecích pod jezy. Jezy navíc během historie často podléhaly nejrůznějším destrukcím a opravám. Akumulace lavic štěrku a písku v úsecích pod jezy (Všenory, Černošice) jsou doloženy již ve středověku (F. Stehlík, osobní sdělení).

Cílem tohoto příspěvku je prezentovat orientační data o složení valounové frakce fluvialních sedimentů koryta řeky Berounky ve spodní části jejího toku a diskutovat přítomnost strusky v nich z hlediska možné redistribuce vltavinů fluvialními procesy. Zdrojová data, ze kterých vychází tento článek, pocházejí z nepublikovaných zpráv Žáka (2005) a Havlíka et al. (2005a; viz též Havlík et al. 2005b). Užitá zrnitostní klasifikace sedimentů a terminologie fluvialních akumulací je založena na přehledné práci Růžičkové et al. (2003). Pro srozumitelnost příspěvku i v technicky orientovaných oborech jsou někde uvedeny ekvivalentní termíny vodohospodářské praxe.

Řeka Berounka ve studovaném úseku a místa vzorkování

Studovaný úsek řeky Berounky Skryje - Radotín je dlouhý zhruba 70 km (v rozsahu ř. km 74.2 až 4.5). Spád je vcelku vyrovnaný a na celém studovaném 70 km dlouhém úseku činí celkem zhruba 56 m (cca 248 až 192 m n. m.). Průměrný průtok v profilu vodočtu Beroun (ř. km. 34.2) je $36.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, povodňový průtok s periodicitou opakování 100 let (Q_{100}) zde byl stanoven na 1500

$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Největší průtok v tomto profilu byl zaznamenán v roce 1872 (cca $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). V srpnu 2002 profilem berounského vodočtu protékalo $2170 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (údaje ČHMÚ; udávaná hodnota pro rok 1872 je zřejmě mírně nadhodnocena; viz diskusi in Žák, Elleder 2007). Rychlosti proudění při povodňových průtocích jsou takové, že po dně Berounky jsou běžně transportovány valouny s velikostí (nejdelší osou) mírně nad 100 mm, ojediněle při extrémních povodních i větší.

V prakticky celém úseku mezi Plzní a Radotínem protéká Berounka poměrně hluboce zařiznutým údolím, většinou se strmými svahy. Malé přítoky řeky Berounky mají proto mnohem strmější podélný spád než Berounka sama a za povodňových situací (hlavně po přívalových srážkách) jsou schopny transportovat i velmi hrubozrný materiál, běžně s většími valouny a kameny, než je schopna transportovat Berounka. Při ústí těchto přítoků do Berounky proto vznikají v nivě a na okraji koryta nápadná akumulací tělesa, pro které se někdy užívá označení ploché výplavové kužely, jiní pracovníci preferují termín aluviální kužely nebo aluviální vějíře (ty by však měly být charakteristické spíše pro aridní oblasti nebo akumulaci z gravitačních proudů). Tyto malé boční přítoky jsou spolu s erozí údolní terasy (tedy břehovými nátržemi v terminologii vodohospodářské praxe) hlavním zdrojem štěrků transportovaných Berounkou. V úseku mezi Plzní a ústím Berounky do Vltavy lze přítoků různého řádu, transportujících alespoň občas středně a hrubé štěrky, napočítat zhruba 200.

Pro vzorkování štěrků koryta Berounky bylo zvoleno 5 profilů. První z nich byl v ř. km 74.2 zhruba 900 m pod mostem ve obci Skryje, na horním okraji nápadných štěrkových lavic ve středu koryta řeky. Další profil se nacházel v ř. km 49.9 těsně pod obcí Račice nad Berounkou, na štěrkové lavici ve středu řeky. Třetí profil byl lokalizován v ř. km 37.5 nad Berounem, na štěrkové lavici vybíhající z levého břehu do středu řeky, zhruba 1 km pod bývalými železárnami ve Staré Huti (dnešním Hýskově). Následoval profil na štěrkových lavicích zhruba 150 m pod jezem v Zadní Třebani v ř. km 21.4 a posledním vzorkovaným místem byly štěrkové lavice (za nízkého stavu vody ostrovy) ve středu koryta mezi Černošicemi a Radotínem v ř. km 4.5.

Metodika

Vzorky byly odebírány za nízkého vodního stavu v řece během června 2005. Byly přitom voleny štěrkové akumulace s největšími valouny o délce nejdelší osy okolo (nebo mírně nad) 100 mm, které představují z hlediska velikostního nejhojnější typ materiálu uložený řekou přímo v korytě. Vzorkování bylo vždy zaměřeno na akumulace více vzdálené od břehů, aby byly pokud možno potlačeny lokální vlivy. Současně nebyla volena místa bezprostředně pod ústím významnějších přítoků. Rozložení vzorkovacích míst navíc zohledňovalo hlavní litologické hranice horninového prostředí nacházejícího se podél toku řeky.

Při vzorkování byla z povrchu štěrkové akumulace nejprve odstraněna svrchní vrstva valounů, kde jsou valouny pokryty organickým povlakem, rostlinami nebo blátem a kde je tedy jejich petrografická identifikace obtížnější. Poté byla z plochy zhruba 0.5×0.5 metru odebrána rovnoměrně vrstva štěrku tak, aby byl celkem získán objem vzorku sedimentu 30 litrů. Objem byl hrubě odměřován do plastové nádoby, s lehkým setřesením materiálu. Vzhledem k velikosti valounů a tedy nerovnému povrchu materiálu v odběrné nádobě je chyba měření objemu vzorku

cca $\pm 10\%$. Celý vzorek byl potom dopraven do laboratoře k dalšímu zpracování. Velikost vzorku tedy byla zvolena tak, aby i u středních a hrubých valounů byla zjištěná data o zastoupení jednotlivých typů hornin dostatečně reprezentativní a statisticky významná. Je třeba uvést, že odběr vzorku je vůbec nejsložitější část celého výzkumu, protože při odběru, zejména pokud se odběrový výkop zaplavuje vodou, je velmi obtížné zachovat poměr jednotlivých velikostních frakcí přesně takový, jaký je v přirozeném uložení štěrku. Čistě z hlediska velikostní analýzy by bylo vhodné velikost vzorku ještě podstatně zvětšit, tím by byla tato nejistota potlačena. Potom by již ale nebylo možné petrograficky hodnotit jednotlivé valouny, protože jejich počet by byl příliš vysoký.

V laboratoři byly nejprve za mokra na síti s oky 16 mm odděleny valouny o velikosti nad 16 mm a promyty vodou. Frakce nad 16 mm byla vysušena, valouny této frakce byly spočítány a zváženy. Ve vzorcích dané zrnitosti o objemu zhruba 30 litrů bylo 675 až 1187 kusů valounů nad 16 mm a okolo 100 kusů valounů o velikosti nad 32 mm. Valounová frakce o velikosti nad 16 mm představovala u všech vzorků nadpoloviční část hmotnosti celého vzorku štěrku. Při volném nasypání samostatné frakce nad 16 mm do vzorkovací nádoby vyplňoval materiál výrazně nadpoloviční podíl vzorkovaného objemu 30 litrů. Menší velikostní frakce tvoří tedy hlavně výplň mezer středně zrnitého a hrubozrnitého štěrku.

V dalším kroku zpracování vzorků byla u 100 kusů největších valounů každého vzorku určena makroskopickým odhadem (za využití mineralogické lupy na čerstvých lomech valounů) petrografie (hornina) a její stratigrafické zařazení. V tomto subjektivním určení hornin může být určité procento chybně zařazených valounů (do 5 obj. %). Některé valouny netypických nebo silicifikovaných hornin nebylo možné vůbec zařadit. U každého z těchto 100 největších valounů každého vzorku byly také změřeny rozměry ve třech osách a jednotlivě určena hmotnost každého valounu. Přesnost vážení valounů byla ± 10 g. Úplné údaje, tedy rozměrové charakteristiky jednotlivých valounů a jejich hmotnosti, jsou uvedeny ve zprávě (Žák 2005). Těchto samostatně hodnocených 100 valounů každého vzorku představovalo podstatný podíl hmotnosti celého vzorku (u jednotlivých vzorků to bylo 29.2 až 39.9 % celkové hmotnosti).

Další valouny až do velikostní hranice 16 mm již nebylo možné vzhledem k jejich počtu (vyšší stovky ks) hodnotit jednotlivě. U některých vzorků byly proto orientačně vybrány některé nápadné a snadno určitelné typy valounů (jako je například žilný křemen, neoproterozoické břidlice a droby a podobně) z celé frakce nad 16 mm a bylo hodnoceno jejich zastoupení. V zásadě lze říci, že vzorek 100 největších valounů poměrně dobře reprezentuje celou frakci nad 16 mm. Z celé frakce nad 16 mm byla u všech vzorků vybrána veškerá antropogenní struska, jejíž zastoupení bylo hodnoceno samostatně.

Velikostní frakce pod 16 mm byla hrubě odkalena (v nádobě byly vodou vymyty nepodstatně zastoupené částice prachové a jílové velikosti, které nejsou v sumě hmotnosti uvedeny) a vysušena. Z velikostní frakce pod 16 mm byla dále síťováním za sucha vytříděna na síti s oky 2 mm písčité frakce. Následně byly stanoveny suché hmotnosti frakce pod 2 mm a frakce 2 až 16 mm.

Uvedené uspořádání odběru a zpracování vzorků umožňuje vyjadřovat výsledky valounové analýzy hrubého podílu valounové frakce jak v procentech valounů tak v hmotnostních procentech zastoupení jednotlivých typů

Tabulka 1 Souhrn výsledků velikostní analýzy, celkové zastoupení velikostních frakcí

Vz. č.	Říč. km	Místo odběru	Celkový objem vzorku	Celková hmotnost vzorku	Hmotnost frakce <2mm	Hmotnost frakce 2-16 mm	Hmotnost frakce >16 mm	Počet valounů frakce >16 mm	Hmotnost 100 největších valounů hodnocených petrograficky
			l	g (%)	g (%)	g (%)	g (%)	n	g (%)
BŠ-1 Skryje	74.2	1	cca 30	57010 (100)	3920 (6.87)	22330 (39.17)	30760 (53.96)	991	16670 (29.24)
BŠ-2 Račice n. B.	49.9	2	cca 30	60020 (100)	9260 (15.43)	16330 (27.21)	34430 (57.36)	1 135	21200 (35.32)
BŠ-3 Beroun	37.5	3	cca 30	55410 (100)	5580 (10.07)	14760 (26.64)	35070 (63.29)	1 187	22120 (39.92)
BŠ-4 Zadní Třeboň	21.4	4	cca 30	58340 (100)	6690 (11.47)	21930 (37.59)	29720 (50.94)	675	21930 (37.59)
BŠ-5 Radotín	4.5	5	cca 30	58655 (100)	7250 (12.63)	16750 (28.56)	34655 (59.08)	1 131	17425 (29.71)

Popis místa odběru: **1** - Skryje, štěrková lavice nad ústím Úpořského potoka ve středu řeky, horní okraj ostrova; **2** - Račice n. B., na spodním okraji obce, akumulace štěrku nedaleko středu toku, nad ústím údolí zvaného Stříbrňák; **3** - Mezi Hýskovem a Berounem, čerstvá akumulace, při středu řeky, špička štěrkové lavice vyběhajícího směrem proti proudu asi 100 m pod tzv. Zdí; **4** - Hlásná Třeboň, štěrková akumulace uprostřed řeky, zhruba v úrovni hladiny při nízkém stavu, 150 m pod jezem v Třebani; **5** - Radotín, horní okraj čerstvé štěrkové lavice, zhruba 700 m proti proudu řeky od lávky v Radotíně, mírně vlevo od středu řeky

Tabulka 2 Zastoupení hornin ve valounové frakci, podle 100 největších valounů každého vzorku

Vzorek	BŠ-1	BŠ-2	BŠ-3	BŠ-4	BŠ-5	BŠ-1	BŠ-2	BŠ-3	BŠ-4	BŠ-5
Říční km	74.2	49.9	37.5	21.4	4.5	74.2	49.9	37.5	21.4	4.5
Lokalita	Skr	Rač	Ber	Tře	Rad	Skr	Rač	Ber	Tře	Rad
	v % valounů					v hmot. %				
Křemen čistý, žilný	11	9	16	18	30	7.1	6.5	15.5	15.1	27.9
Metamorfované horniny, ruly, svory atd.	1					0.9				
Neoproterozoikum, silicity (bulizníky)	5	17	16	13	11	2.5	22.1	12.6	18.2	8.0
Neoproterozoiku, břidlice a droby	32	21	7	7	3	19.7	12.2	2.7	3.5	3.2
Neoproterozoikum, vulkanity (spility)	10	13	7	1	1	10.3	19.1	4.3	0.6	0.4
Kambrium, slepence a pískovce	6	8	4	14	17	17.7	11.6	12.7	18.4	20.3
Kambrium, ryolity a jejich tufy	6	7	1	3	3	10.3	8.0	0.5	3.9	9.6
Kambrium, andezity a dacity	13	10	3	1	3	16.1	8.2	1.3	1.5	1.4
Kambrium, břidlice skryjské	5					3.9				
Ordovik, křemence nerozlišené	4	5	23	13	19	5.3	6.3	26.6	13.7	18.7
Ordovik, břidlice nerozlišené				1	7				0.2	5.5
Ordovik, vulkanity (diabasy)			3					5.1		
Ordovik spodní, červené silicity	1	2	1	2	3	1.3	1.3	0.4	1.4	2.0
Silur, vulkanity (diabasy)				13					15.5	
Silur, černé břidlice				1					0.8	
Silur a devon, vápence nerozlišené				5					3.0	
Karbon, arkózy			2					1.4		
Antropogenní - cihla, střešní taška		1	3		1		0.5	5.2		0.7
Antropogenní - struska, škvára			8	2				4.9	0.5	
Neurčené valouny	6	7	6	6	2	4.9	4.2	6.8	3.6	2.2
Suma	100	100	100	100	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Dílčí součty (%)										
Neoproterozoikum, vše	47	51	30	21	15	32.4	53.4	19.6	22.4	11.6
Kambrium, vše	30	25	8	18	23	48.1	27.7	14.5	23.9	31.3
Ordovik, vše	5	7	27	16	29	6.7	7.6	32.1	15.4	26.2
Silur a devon, vše	0	0	0	19	0	0.0	0.0	0.0	19.2	0.0
Antropogenní, vše	0	1	11	2	1	0.0	0.5	10.0	0.5	0.7
Trvanlivé křemenné horniny	27	41	60	60	80	33.9	47.9	67.7	66.9	77.0

Lokalita: Skr - Skryje; Rač - Račice n. B.; Ber - Beroun; Tře - Zadní Třeboň; Rad - Radotín (platí i pro tab. 3)

Tabulka 3 Hodnocení zastoupení strusky ve štěrcích řeky Berounky

Vzorek	BŠ-1	BŠ-2	BŠ-3	BŠ-4	BŠ-5
Říční kilometr	74.2	49.9	37.5	21.4	4.5
Lokalita	Skr	Rač	Ber	Tře	Rad
Zastoupení valounů strusky v rámci 100 největších valounů:					
Počet valounů strusky v rámci 100 největších (=procent valounů)	0	0	8	2	0
Hmotnost strusky v rámci 100 největších valounů (g)			1080	105	
Procent hmotnosti v rámci 100 největších valounů (%)			4.9	0.5	
Struska (z celé frakce nad 16 mm)					
Počet všech valounů strusky >16 mm (n)	5	6	145	31	4
Procent valounů frakce >16 mm (%)	0.5	0.5	12.2	4.6	0.4
Hmotnost všech valounů strusky >16 mm (g)	38.3	48.5	3079.2	331.8	37.9
Procent hmotnosti frakce >16 mm (%)	0.12	0.14	8.78	1.12	0.11
Průměrná hmotnost valounu strusky v rámci frakce >16 mm (g)	7.66	8.08	21.24	10.70	9.48
Průměrná obj. hmotnost veškeré strusky frakce >16 mm (g/cm ³)	2.13	2.43	2.69	2.01	1.65

hornin. Získaná data jsou obsažena v tabulkách 1 až 3.

Provedenou studii lze považovat jen za počáteční, spíše technicky než vědecky orientovanou valounovou analýzu současných štěrků Berounky. Plnohodnotný vědecký přístup by vyžadoval jednak mnohem větší počet vzorků (řádově desítky, zhruba každých 2 až 5 km toku) a podrobnější velikostní analýzu, tedy síťování vzorků na podstatně větším počtu sít, s podrobnějším odstupňováním velikostních kategorií (typický úplný standardní postup jde „po polovině ϕ “ v Krumbeinově škále; Krumbein 1934), tedy velikostní kategorie jsou (vše v milimetrech) < 4; 4 - 5.7; 5.7 - 8; 8 - 11.3; 11.3 - 16; 16 - 22.6; 22.6 - 32; 32 - 45.3; 45.3 - 64; 64 - 90.5; 90.5 - 128; 128 - 181; 181 - 256 atd. Takový přístup potom umožňuje definovat jednak medián velikostního rozdělení (50tý percentil, tedy velikostní kategorii, nad a pod kterou je stejná hmotnost materiálu), a případně další percentily. Jedině porovnáním mediánu nebo příslušných percentilů lze jednoznačně doložit, zda se materiál směrem po toku velikostně zmenšuje abrazí nebo se velikostně třídí. Rozměrové charakteristiky jednotlivých valounů by taktéž měly být hodnoceny pro každý petrografický typ samostatně, na dostatečném počtu valounů, a stupeň zaoblení („differences in roundness“; Mills 1979) by také mělo být hodnoceno mnohem podrobněji. Příkladem dobré detailní studie tohoto typu je třeba práce Gomeze et al. (2001). Dostupné financování umožnilo jen provedení částečné analýzy na menším počtu vzorků, tak jak je shrnuto v tomto příspěvku.

Výsledky valounové analýzy, vyhodnocení dat a diskuse

Vývoj spádové křivky řeky během nejmladší geologické historie

V průběhu poslední doby ledové bylo údolí řeky Berounky v určitém stadiu jeho vývoje ve sledovaném úseku prohloubeno o 5 až 10 m hlouběji než je dnešní stav (obecně k vývoji říčních systémů během posledního glaciálu a holocénu v Evropě (např. Vandenberghe et al. 1994; Vandenberghe 1995; Mol et al. 2000; Vandenberghe 2003). Zahloubení koryta Berounky dokládají četné vrtné a zakládací stavební práce ve studovaném úseku, které obvykle zastihnou skalní dno údolí až několik metrů pod dnešním dnem řeky (např. Včíslová 1980; přehledně Balatka, Loučková 1991). Tato morfolgie údolního dna byla potvrzena i geofyzikálními pra-

cemi (např. Dohnal et al. 2003; Stehlík 2006). Později (zřejmě koncem glaciálu a počátkem holocénu) došlo k rychlé akgradaci řeky o několik metrů a vytvoření dnešní nivy. Na jejím povrchu sedimentovaly, zejména počínaje zhruba 13. stoletím, jemnozrnné fluvialní sedimenty ukládané z kalných povodňových vod mimo koryto řeky. Mocnost těchto jemnozrnných fluvialních prachovito-písčitých sedimentů kryjících nivu Berounky je ve středním toku řeky obvykle 1 až 2 m, směrem k soutoku s Vltavou stoupá jejich průměrná mocnost na více než 3 m (Stehlík 2006). Berounka tedy prakticky všude ve sledovaném úseku teče po vlastních štěrkových akumulacích a skalní dno údolí není obnaženo, s výjimkou některých míst, kde se boční eroze řeky přibližuje v nárazovém břehu k patě údolního svahu. Koryto řeky Berounky je tedy prakticky všude v popisovaném úseku (kromě regulovaných úseků) vytvořeno v akumulacích říčních štěrků krytých povodňovými hlínami, které mohou být poměrně snadno napadeny jak hloubkovou, tak i boční erozí.

Před stavbou jezů a dalšími umělými zásahy do koryta řeky byla podélná spádová křivka řeky (vzhledem k tomu, že prakticky nikde nevystupovaly skalní prahy v jejím dně) vcelku vyrovnaná. Lokální změny podélného spádu vznikaly hlavně při ústí přítoků, které mají v popisovaném úseku všeobecně větší spád než Berounka a které jsou tedy za povodňových průtoků schopny transportovat hrubý štěrk. Akumulační tělesa při ústí těchto přítoků zužují příčný profil koryta, vedou k depozici materiálu transportovaného řekou na své návodní straně a ke zvýšení spádu Berounky v úseku těsně pod přítokem nebo v jeho úrovni. Úseky strmějšího podélného spádu koryta se v těchto místech udržují stálou dotací hrubého štěrku z bočního údolí. Klasickým případem takového jevu je například ústí Úpořského potoka v ř. km 74.0 nebo ústí Žloutavy v ř. km 48.9. Další z možností, jak mohla být spádová křivka řeky lokálně ovlivněna, je skalní řízení v místech, kde jsou skalní stěny v bezprostředním dosahu koryta (např. Týřovické skály v ř. km 73 nebo Čertova skála u Nezabudic v ř. km 71).

Mnohem větší vliv na narušení přirozeného vyrovnaného spádu koryta ale měla stavba jezů. Těch je v popísaném úseku toku na hlavním korytě řeky 14 s výškou stupně v rozmezí 0.6 až 2.5 m. V úseku mezi obcí Skryje a ústím do Vltavy překonává Berounka ¼ z celkového spádu právě na stupních jezů. Po stavbě jezů se řeka, zjednodušeně řečeno, snaží dosáhnout nového rovno-

vážného stavu koryta a o vyrovnání spádové křivky depozicí materiálu jak nad jezy, tak i pod nimi. Snaží se tedy vytvořit novou rovnovážnou spádovou křivku, vedenou po přelivných hranách jezů. Původní zdrže nad jezy jsou již pohybem materiálu po dně z větší míry zaneseny (Havlík et al. 2005a), takže štěrky jsou transportovány za povodňových situací ve velkých objemech i přes jezy a ukládány často pod nimi.

Diskuse souhrnných dat o zastoupení jednotlivých velikostních frakcí ve studovaných vzorcích

Maximální velikost největších valounů v současných štěrcích Berounky v materiálu, který se pohybuje korytem na větší vzdálenosti, zpravidla mírně přesahuje 100 mm (v délce nejdelší osy valounu). Valouny s nejdelší osou nad 150 mm se vyskytují již jen ojediněle, nejčastěji v místech blízko přítoků. Po povodni v srpnu 2002 byly ojediněle transportovány i valouny s délkou nejdelší osy nad 200 mm.

Celkové suché hmotnosti odebraných vzorků o přibližném objemu 30 litrů byly v rozmezí od 55410 do 60020 g, objemová hmotnost volně sypaného štěrku (s lehkým setřesením, a v suchém stavu) je blízká nebo mírně pod 2000 kg · m⁻³. Rozdíly v hmotnosti mezi jednotlivými vzorky jsou dány jednak chybou v měření jejich objemu v terénu ($\pm 10\%$), a dále zastoupením hornin s vyšší objemovou hmotností, jako jsou například spility neoproterozoika, nejhojnější ve vzorku z Račic nad Berounkou, který má současně nejvyšší hmotnost (viz tab. 1 a 3). Obrázek 1 ukazuje hmotnosti 100 největších valounů každého vzorku.

U všech odebraných vzorků představuje velikostní frakce nad 16 mm nadpoloviční část celkové hmotnosti vzorku (50.94 až 63.29 % celkové hmotnosti u jednotlivých vzorků) a při volném nasypání vyplňuje frakce nad 16 mm podstatnou část vzorkovaného objemu 30 litrů. Medián velikostního rozdělení štěrků, tedy valoun takové velikosti, že nad ním i pod ním je stejná hmotnost, je u všech odebraných vzorků v intervalu mezi 16 a 32 mm.

V přirozeném uložení v korytě byla část vzorků bližší takovému uložení, kdy se jednotlivé valouny frakce nad 16 mm navzájem dotýkají a drobný štěrk a písek vyplňuje jen mezerní prostory mezi nimi („pebble supported“, podpůrná struktura valounů, Račice nad Berounkou, Beroun, Radotín), část vzorků měla spíše valouny uložené v matrix tvořené drobným štěrskem a pískem („matrix-supported“, podpůrná struktura matrix, Skryje, Zadní Třeboň).

Valouny nejhojněji zastoupených typů hornin se poněkud liší svými tvary, podmíněnými vlastnostmi horniny. Pokud použijeme poměr nejdelší a nejkratší osy valounu, tak nejnižší průměrná hodnota tohoto poměru je u valounů žilného křemene (2.00), následují valouny neoproterozoických spilitů (2.27) a silicitů (buližníků, poměr 2.28), potom valouny kambrických ryolitů (2.29), valouny kambrických konglomerátů a pískovců (2.39), valouny kambrických dacitů a andezitů (2.60), ordovických křemenců (2.64) a nejvíce se tímto parametrem odlišují nápadně ploché valouny neoproterozoických břidlic a drob (3.40).

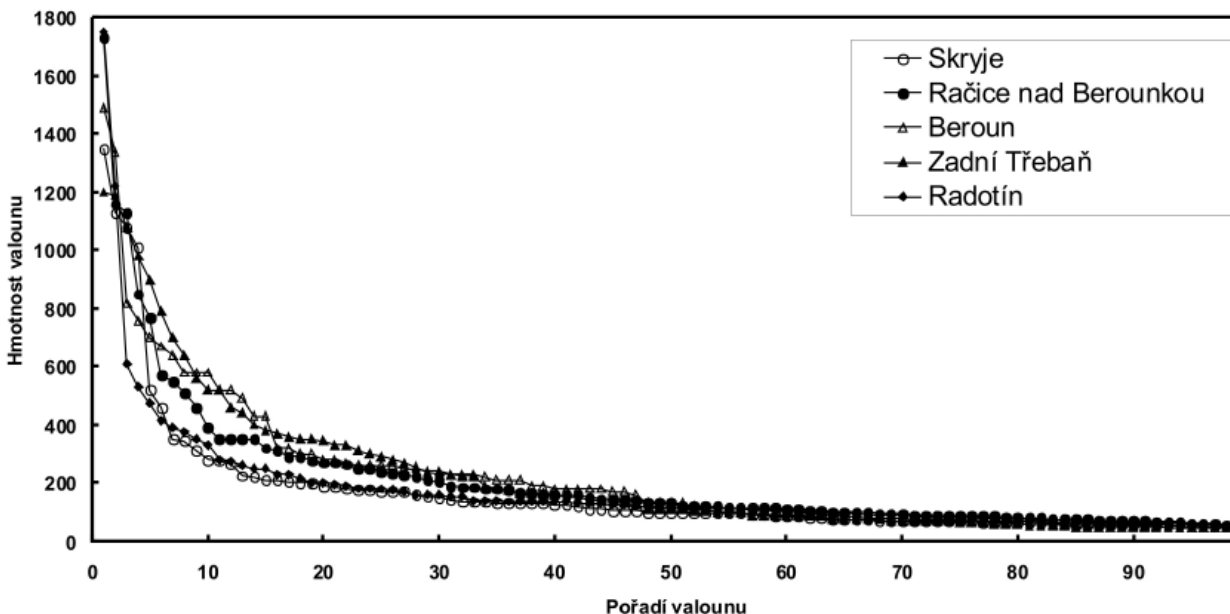
Hodnocení a diskuse zastoupení a původu jednotlivých typů hornin

Níže uvedená data vycházejí z petrografického hodnocení 100 největších valounů každého vzorku (tab. 2).

Žilný a sekreční křemen

V jednotlivých vzorcích, ve směru po toku, činilo zastoupení světlých nebo bílých valounů křemene ve valounových procentech: Skryje 11 %, Račice n. B. 9 %, Beroun 16 %, Zadní Třeboň 18 %, Radotín 30 %. V hmotnostních procentech: Skryje 7.1 %, Račice n. B. 6.5 %, Beroun 15.5 %, Zadní Třeboň 15.1 %, Radotín 27.9 %.

Zastoupení žilného křemene tedy zřetelně narůstá ve směru po toku. Křemen lze považovat za nejodolnější složku říčních štěrků Berounky, s největší délkou transportu. Délka transportu valounů křemene (včetně případné resedimentace materiálu z údolní terasy) nepochybně činí nejméně první desítky kilometrů. Jinak by křemenné valouny nemohly zvyšovat své zastoupení v úseku,



Obr. 1 Hmotnosti 100 největších valounů z jednotlivých vzorků, řazených v pořadí podle klesající hmotnosti. Graf ukazuje, že ve studovaném 70 km dlouhém úseku toku nedochází k žádné zřetelné změně velikosti valounů. Největší valoun měl u všech vzorků hmotnost v intervalu 1200 až 1750 g.

kde řeka Berounka prochází paleozoickými sedimenty Pražské pánve a kde se žádné zdroje tohoto typu křemene (kromě starých fluvialních akumulací) nenacházejí. Křemenné žíly jsou velmi hojné v celé oblasti barrandienského neoproterozoika, přitom jejich výskyt se západním směrem (na Plzeňsko a Stříbrsko) se spíše zvyšuje. Část křemenných valounů může pocházet až z oblasti tvořené metamorfovanými horninami, v Českém lese a v Pošumaví (metamorfní sekreční křemeny, křemeny z Českého křemenného valu a souvisejících křemenných žil). Kromě toho je velmi pravděpodobné, že část křemenných valounů je resedimentovaných, tedy pochází ze slepenců karbonu nebo ze starších říčních teras třetihorního a čtvrtohorního stáří.

Nárůst zastoupení valounů křemene v úseku Skryje - Radotín na čtyřnásobek prakticky znamená, že minimálně tři čtvrtiny nekřemenného valounového materiálu byly během transportu v tomto úseku toku spotřebovány obrusem (resp. jejich zbytky se dostaly do frakcí pod 16 mm). Ve skutečnosti (vzhledem k boční dotaci nekřemenného materiálu z přítoků) bylo v tomto úseku obrusem (abrazí) a destrukcí valounů převedeno do menších velikostních frakcí ještě mnohem více než tři čtvrtiny nekřemenného podílu valounové frakce.

Metamorfované horniny a granitoidy

Metamorfované (přeměněné) horniny a granitoidy se ve zkoumaných vzorcích prakticky nevyskytují. Výjimkou byl jediný silně zvětralý valoun ve vzorku Skryje. Hlavní zdrojovou oblastí těchto hornin je oblast moldanubika. Pro transport materiálu ve valounové frakci z horních toků Mže, Radbuzy, Úhlavy a Úslavy tedy nebyly nalezeny žádné doklady. Na Radbuze a Mži je navíc v současnosti transport štěrků a písků vyloučen přehradními vodními díly České údolí a Hracholusky.

U jednotlivých valounů, jako byl případ zjištěný ve vzorku Skryje, připadá navíc v úvahu i možnost jiného typu transportu než ve formě štěrku váleného po dně toku, tedy například přenos valounu zamrzlého v ledu nebo valounu zachyceného v kořenovém systému stromů unášených při povodni, nemluvě o možnostech antropogenního zavlčení. Ve štěrcích řeky Berounky byly často nacházeny valouny křemenců (kvarcitů), které jsou v rámci této studie všechny zařazeny k nemetamorfovaným horninám Barrandienského ordoviku (viz níže). V řadě valounů křemenců lze jejich zařazení k ordovickým sedimentům potvrdit i paleontologicky, podle přítomnosti stop po činnosti organizmů (*Skolithos*, *Pragichnus*).

Horniny barrandienského neoproterozoika

V horninách barrandienského neoproterozoika probíhá většina toku Berounky (až po Hýskov) a většina délky jejích přítoků na Plzeňsku. Horniny z tohoto plošně rozsáhlého celku proto tvoří ve valounové frakci říčních štěrků podstatnou složku. Do koryta řeky jsou tyto horniny hojně dotovány prakticky všemi malými přítoky v úseku po Hýskov. Dalším menším zdrojem valounů těchto hornin ve spodním toku Berounky je i Loděnice (Kačák).

Neoproterozoikum, všechny typy hornin, valounová procenta: Skryje 47 %, Račice n. B. 51 %, Beroun 30 %, Zadní Třeboň 21 %, Radotín 15 %. V hmotnostních procentech: Skryje 32.4 %, Račice 53.4 %, Beroun 19.6 %, Zadní Třeboň 22.4 %, Radotín 11.6 %.

Neoproterozoické horniny lze rozdělit na tři hlavní skupiny: 1. vulkanity, 2. břidlice a droby, a 3. silicity.

Poměrně malou odolnost mají alterované bazické vulkanity neoproterozoika (spility), valounová procen-

ta: Skryje 10 %, Račice n. B. 13 %, Beroun 7 %, Zadní Třeboň 1 %, Radotín 1 %. V hmotnostních procentech: Skryje 10.3 %, Račice n. B. 19.1 %, Beroun 4.3 %, Zadní Třeboň 0.6 %, Radotín 0.4 %.

Podobně jako neoproterozoické vulkanity se chovají i neoproterozoické břidlice a droby, které jsou jen mírně odolnější. Tyto horniny vytvářejí nejčastěji ploché, poměrně snadno rozpoznatelné valouny. Jejich obsah směrem po toku zřetelně klesá, zejména od Hýskova, kde řeka opouští území tvořeného těmito horninami:

Neoproterozoické břidlice a droby, valounová procenta: Skryje 32 %, Račice n. B. 21 %, Beroun 7 %, Zadní Třeboň 7 %, Radotín 3 %. V hmotnostních procentech: Skryje 19.7 %, Račice n. B. 12.2 %, Beroun 2.7 %, Zadní Třeboň 3.5 %, Radotín 3.2 %.

Trvanlivost většiny valounů těchto hornin v korytě řeky tedy nepřesahuje první desítky kilometrů.

Poněkud jinak se chovají křemité horniny (silicity, bulizníky) neoproterozoika. I když tyto horniny nedosahují odolnosti valounů žilného křemene, v toku zřejmě vydrží i vyšší desítky kilometrů (jinak by se nemohly vyskytovat i ve vzorku z Radotína). Bulizníky však většinou nevytvářejí dokonale opracované valouny, jsou křehké a snáze se vyštipují. Zastoupení ve směru podél toku, ve valounových procentech, je: Skryje 5 %, Račice n. B. 17 %, Beroun 16 %, Zadní Třeboň 13 %, Radotín 11 %. V hmotnostních procentech: Skryje 2.5 %, Račice n. B. 22.1 %, Beroun 12.6 %, Zadní Třeboň 18.2 %, Radotín 8.0 %.

Vzhledem k vyšší odolnosti a tedy možnosti delšího transportu, jsou bulizníky dotovány do údolí Berounky i Litavkou a Loděnicí (Kačákem).

Horniny kambria

Horniny kambria jsou celkově ve štěrcích sledovaného úseku Berounky velmi hojně zastoupeny. Souhrnné zastoupení všech hornin kambria činí ve valounových procentech: Skryje 30 %, Račice n. B. 25 %, Beroun 8 %, Zadní Třeboň 18 %, Radotín 23 %. V hmotnostních procentech: Skryje 48.1 %, Račice 27.7 %, Beroun 14.5 %, Zadní Třeboň 23.9 %, Radotín 31.3 %.

Vulkanity kambria, tedy ryolity, dacity, andezity a jejich tufy, vytvářejí mohutný křivoklátsko-rokycanský vulkanický komplex, zejména na pravém břehu Berounky mezi Zvíkovcem a Račicemi. Plošně menší strašický vulkanický komplex leží v povodí Červeného potoka, přítoku Litavky. Vulkanity kambria se lokálně mohou dostávat do koryta Berounky i přímo, skalním říčením nebo pohybem sutí (např. Týřovické skály). V hojně míře je dotují pravostranné přítoky, zejména Zbirožský potok, Úpošský potok a Klučná. Trvanlivost valounů těchto hornin v toku však není velká. Tomu odpovídá i poměrně rychlý pokles jejich zastoupení pod zdrojovou oblastí. Všechny vulkanity kambria, ve valounových procentech: Skryje 19 %, Račice n. B. 17 %, Beroun 4 %, Zadní Třeboň 4 %, Radotín 6 %. V hmotnostních procentech: Skryje 26.4 %, Račice n. B. 16.2 %, Beroun 1.8 %, Zadní Třeboň 5.4 %, Radotín 11.0 %.

Zvýšení zastoupení těchto hornin ve vzorku z Radotína je dáno hlavně výskytem jednoho velkého, málo opracovaného kusu ryolitu. Jeho přítomnost v tomto profilu v dané velikosti a stupni opracování nelze jednoduše vysvětlit.

Ze sedimentů kambria mají největší význam křemenné pískovce (až křemence) a slepence. Tyto horniny jsou mimořádně odolné a jejich valouny jsou běžně transportovány na desítky kilometrů. I daleko od zdrojů

těchto hornin lze nalézt velké, dobře opracované valouny. Zdrojovou oblastí jsou zejména Centrální Brdy, s transportem valounů Klabavou (tam je dnes transport nemožný vzhledem k vodním nádržím u Ejpovic), a zejména Litavkou. Menší oblast výskytu sedimentů kambria se nachází v obce Skryje, v bezprostředním dosahu řeky. Zdejší převážně petromiktní slepence však, s výjimkou křemenných slepenců milečských (vrch Mileč na levém břehu řeky) nemají odolnost slepenců a pískovců centrálních Brd. Na zastoupení těchto hornin v říčních štěrcích je velmi zřetelný vliv Litavky, tedy nápadné zvýšení jejich zastoupení pod ústím tohoto přítoku. Slepence a pískovce kambria, ve valounových procentech: Skryje 6 %, Račice n. B. 8 %, Beroun 4 %, Zadní Třeboň 14 %, Radotín 17 %. V hmotnostních procentech: Skryje 17.7 %, Račice 11.6 %, Beroun 12.7 %, Zadní Třeboň 18.4 %, Radotín 20.3 %.

Kromě těchto odolných hornin byly ve vzorku Skryje zastoupeny ještě místní skryjské břidlice (5 % valounových, resp. 3,9 % hmotnostního), které se do toku dostávají Zbizožským potokem a dalšími menšími přítoky. Trvanlivost těchto hornin v korytě Berounky je však minimální, stěží mohou vydržet více než první kilometry.

Horniny ordovíku

Z hlediska plošného tvoří horniny ordovíku větší část Pražské pánve (tedy barrandienského ordovíku až devonu). Jsou to však většinou horniny málo odolné, břidlice, prachovce, droby a snadno zvětrávající vulkanity (diabasy), které nejčastěji zvětrávají již přímo na výchoze. Výrazně větší odolnost mají zejména křemence ordovíku, které se vyskytují zejména v souvrství dobrotvického a libeňského (křemence skalecké a řevnické). Odolné křemenné horniny jsou zastoupeny ještě i v souvrství letenském. Ve spodním ordovíku se vyskytují většinou červeně zbarvené silicity v souvrství mílinském, červené typy křemenů jsou spjaty s ložisky spodnoordovických železných rud, hlavně na Komárovsku.

Do území tvořeného horninami ordovíku vstupuje Berounka v obci Hýskov, báze ordovíku hlavní části Pražské pánve, tvořená zde rozpadavými vulkanity a tufy, se nachází v blízkosti jezu v Hýskově. Odolné křemence zařazené k ordovíku byly však nalezeny i ve vzorcích výše proti proudu od Hýskova. Západní část Pražské pánve totiž zasahuje až na Plzeňsko, kde dochází k transportu těchto hornin do Berounky pravostrannými přítoky (Klabavou, Zbizožským potokem). V této oblasti tvoří ordovické křemence z nápadných krajinných dominant například hřeben Radče nedaleko Lhoty pod Radčem. Může se jednat i o resedimentace valounů z karbonických slepenců nebo starších říčních teras. Celkově tvořily horniny ordovíku ve valounových procentech: Skryje 5 %, Račice n. B. 7 %, Beroun 27 %, Zadní Třeboň 16 %, Radotín 29 %. V hmotnostních procentech: Skryje 6.7 %, Račice n. B. 7.6 %, Beroun 32.1 %, Zadní Třeboň 15.4 %, Radotín 26.2 %.

Kromě odolných křemenců byly ve vzorku z Berouna zjištěny i ordovické vulkanity (nejlépe v řece odolávají diabasové mandlovce) a ve vzorku z Radotína poměrně vysoké zastoupení měkkých hornin ordovíku, prachovců a břidlic (7 valounových resp. 5.5 hmotnostních %). Tyto málo odolné horniny zřejmě dotují lokální přítoky, zejména Svinařský potok a Švarcava.

Horniny siluru a devonu

Silursko-devonským jádrem Pražské pánve (Barrandienu) protéká Berounka v úseku mezi Berounem a Zad-

ní Třebaní. Nápadným typem horniny, poměrně běžným v říčních štěrcích jsou zde málo odolné silurské diabasy. Tyto horniny tvoří nápadné skály jak pod Berounem u Lištic a nádraží ČD v Berouně, tak potom i na spodním okraji Karlštejna a v okolí Třebaně. Velká část těchto hornin se mohla do řeky dostat i nepřímo, zásluhou lidí. Většina stavby navigace Berounky v tomto úseku byla počátkem 20. století realizována právě z těchto hornin, těžných v lomech u Berouna. Diabasy siluru byly zjištěny jen ve vzorku z Třebaně a to v poměrně velkém zastoupení, 13 valounových resp. 15.5 hmotnostních %. Část materiálu mohla pocházet i z destrukce jezu v Třebani. Do řeky se kromě toho dostával materiál i při hracích pracích pro stavbu železniční trati.

Měkké břidlice siluru valouny nevytvářejí. Jediný valoun graptolitové břidlice, zřejmě zpevněný kontaktním působením diabasu, byl zjištěn ve vzorku z Třebaně.

Vápence siluru a devonu tvoří stěny kaňonu Berounky mezi Tetínem a Karlštejnem. Jsou to horniny jak mechanicky poměrně málo odolné, tak i podléhající rozpouštění říční vodou. Kromě vlivu přítoků se poměrně značné množství vápence mohlo dostat do koryta i při úpravách pobřežních komunikací a říčních navigací v daném úseku, při těžbě v četných lomech a při stavbě železniční trati. Ve vzorku z Třebaně, tedy přibližně 3 km pod posledním výskytem vápenců, bylo zjištěno vápenců 5 % valounových (3 hmot. %). Všechny valouny jeví výrazné stopy rozpouštění (valouny s konkávními tvary na povrchu).

Horniny karbonu

Karbonské sedimenty tvoří v dosahu Berounky zejména plzeňskou, radnickou a kladensko-rakovnickou pánve. Obecně karbon neobsahuje ve větší míře horniny schopné delšího transportu. Karbonické slepence a arkózy jsou většinou rozpadavé, pevnější křemité horniny z Rakovnícka nebyly ve štěrcích Berounky nalezeny.

V Hýskově kříží tektonicky omezený relikt karbonických klastik přímo údolí řeky. Ve vzorku Beroun, asi 3 km pod tímto místem, byly zjištěny dva valouny rozpadavých karbonických křemité arkóz. V tomto případě se může jednat i o antropogenní zavlečení, neboť v jednom období byly karbonické arkózy (tzv. kštelový kámen) užívány pro zhotovení žáruvzdorných vyzdívek železářských pecí (Šťastný 2003). Po povrchové i podzemní těžbě karbonických arkóz se dochovaly pozůstatky mezi obcemi Hýskov a Zdejcina.

Antropogenní materiály

Cihly a střešní tašky (tedy červená vypálená cihlářská hlína) jsou zastoupeny ve štěrcích Berounky ve studovaném úseku v obsazích nejčastěji okolo 1 %, lokálně byly zjištěny cihly z vysokopecních vyzdívek (vzorek Beroun) v obsahu do 3 % (valounových), resp. 5.2 % hmotnostních. V intravilánech větších obcí tvoří cihly běžně první procenta říčních štěrků.

Z antropogenních materiálů je však, jak již bylo uvedeno výše, nejzajímavější sledovat zastoupení valounů vysokopecní železářské strusky. Struska je převážně sklovitého vzhledu, tmavě zelená nebo šedá až černá, s různě velkým obsahem bublin. Jednotlivé valouny strusky nebyly mineralogicky ani rentgenograficky analyzovány, pouze studovány pod binokulární lupou. Převaha valounů strusky je tvořena ve slabších úlomcích průhledným zeleným sklem. Menší podíl valounů strusky se jeví jako krystalický, neprůhledný. Neprůhledné, zřejmě v převaze krystalické typy strusky mají někdy zbytkový obsah nedokonale odmíšeného železa. Tím je dán velmi široký roz-

sah objemové hmotnosti valounů strusky.

Kromě hlavního zdroje, tedy železáren v Nové a Staré Huti, se do štěrků Berounky mohla železářská struska dostávat i tokem Klabavy, Zbizožského potoka a Litavky, ale v řádově menších množstvích. V těchto případech totiž nebyly haldy strusky v přímém dosahu povodňových vod jako v případě Nové Huti - Nižbora a Staré Huti - Hýskova. Data o zastoupení strusky ve vzorcích jsou v tabulce 3. V případě poměrně snadno rozpoznatelné strusky byla hodnocena celá frakce nad 16 mm, nejen 100 největších valounů jako u přírodních hornin.

V místě zhruba 1 km pod Hýskovem (vzorek Beroun) je zastoupení strusky ve štěrcích až 12.2 valounových (8.78 % hmotnostních, z celé frakce nad 16 mm). Průměrná objemová hmotnost strusky je zde $2.69 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. V Třebani, dalších 16.1 km ve směru po toku, je strusky již jen 4.6 % valounových (1.12 % hmot.) a její průměrná objemová hmotnost je $2.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Nad Radotínem, dalších 16.9 km po toku, od hlavního zdroje strusky celkem tedy 33.0 km, je strusky již jen 0.4 % valounového a 0.11 % hmotnostního, s objemovou hmotností jen $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Je tedy velmi dobře vidět, jak strusky ve valounové frakci směrem po proudu rapidně ubývá (destrukcí valounů a tím přechodem do frakce pod 16 mm a abrazí valounů) a jak se snižuje její objemová hmotnost, tedy kusy s nižší objemovou hmotností jsou transportovány nejdále (viz též obr. 2).

Změna velikosti valounů během transportu

V běžných podmínkách povrchových toků dochází během transportu materiálu k zmenšování velikosti transportovaných částic směrem po toku v důsledku jejich obrusu (abrazie), vzájemným třením a nárazy. Této problematice je věnována poměrně bohatá literatura. Již v 19.

století byl odvozen tzv. Sternbergův zákon (Sternberg 1875; formulace dnes užívaného vzorce Barrell 1925), podle kterého se hmotnost valounu (částice) v toku exponenciálně snižuje během transportu podle vztahu:

$$W = W_0 \cdot e^{-aX}$$

kde W = hmotnost valounu ve vzdálenosti X od počátku

W_0 = počáteční hmotnost valounu

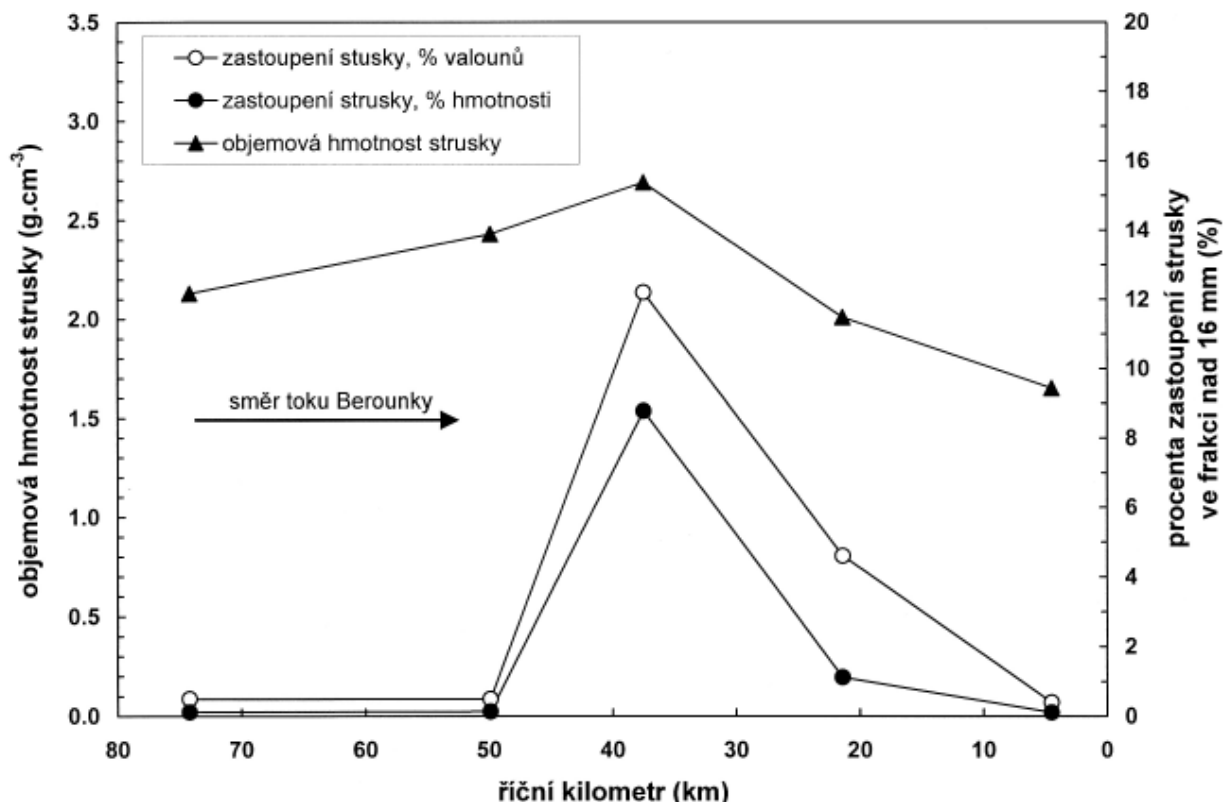
a = je koeficient, který se liší pro každý tok a každý typ horniny

X = vzdálenost, délka transportu směrem po toku

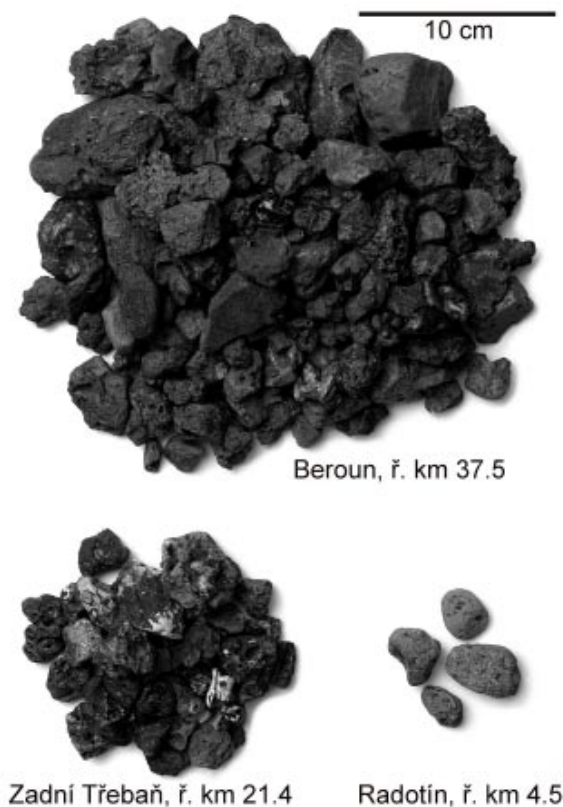
Abrazie valounů během transportu je obecně velmi rychlá, jak vyplývá ze Sternbergova zákona, nejrychlejší je pro velké valouny. Obvykle se uvádí, že medián hmotnostního rozdělení transportovaného materiálu (tedy valoun takové velikosti, že frakce, která je velikostně nad ním a pod ním mají stejnou hmotnost) se snižuje na polovinu během každých 10 až 100 km transportu. To by ovšem platilo v případě, že nedochází k žádné dotaci materiálu z přítoků. Ve studovaném úseku řeky Berounky není patrné žádné zřetelné zmenšování velikosti valounů štěrků v celém posuzovaném 70 km dlouhém úseku. Medián je u všech vzorků ve velikostní kategorii 16 až 32 mm. To je další doklad skutečnosti, že dotace materiálu přítoky má podstatný vliv. Pokud by byl veškerý materiál transportován celým tokem, velikost valounů by se směrem po toku musela zákonitým způsobem zmenšovat.

Diskuse transportu strusky

Zastoupení strusky ve štěrcích koryta Berounky velmi zřetelně klesá ve směru fluviálního transportu od největšího zdroje. Ve stejném směru klesá její objemová hmotnost a velikost největších valounů strusky (tab. 3, obr. 3). Otázkou samozřejmě je, zda za dobu 137 let mezi masivním vstupem strusky do toku (r. 1872) a vzorkováním



Obr. 2 Grafické znázornění zastoupení valounů strusky v písčítých štěrcích koryta Berounky a objemové hmotnosti strusky.



Obr. 3 Fotografie veškerých valounů strusky ve velikostní fraci nad 16 mm ze vzorků Beroun, Zadní Třeboň a Radotín, tedy ve směru podle toku pod největším zdrojem strusky v Hýskově. Foto J. Brožek.

(r. 2005) bylo již dosaženo určité dynamické rovnováhy v jejím transportu vodním tokem. Tedy zda v dalším období bude její zastoupení ve vzorcích více vzdálených od zdroje ještě růst nebo již klesat dalším ředěním materiálem z bočních přítoků, z eroze údolní terasy a destrukcí a obrusem valounů. Zajímavé by proto bylo tuto studii opakovat po několika dalších větších povodních na stejných místech vzorkování a sledovat, jak se zastoupení valounů strusky změnilo.

Dnešní složení štěrku koryta Berounky bohužel bylo kromě přírodního fluvialního transportu valounů ovlivněno řadou dalších antropogenních zásahů, z nichž nejvýznamnější byla těžba štěrku a písku ze dna řeky pro stavební a sanační těžby novotvořených akumulací štěrku v korytě. Havlík et al. (2005a, b) se pokusili tyto těžby na spodním toku Berounky kvantifikovat. Těžby štěrku a písku ze dna řeky se prováděly zejména od 30. do poloviny 60. let 20. století. Jednotlivá povolení k těžbě uložená v archivech většinou sice obsahují povolený maximální denní objem těžby, nikoliv ale data o skutečně vytěžených objemech. Největší význam měly těžby plovoucími bagry pro stavební firmy v Berouně a Hýskově a později pro Prefu v Hýskově. Z dostupných dat lze hrubě odhadnout celkový objem těchto průmyslových těžeb mezi ř. km 46.18 a 35.5 do rozmezí 200 až 600 tis. m³. Sanační prohrábky koryta lze naopak kvantifikovat poměrně dobře, protože jednotlivé projekty obsahují údaje o množství. V letech 1970 až 1990 mělo být podle projektů v úseku mezi ř. km 53.3 a 4.4 během celkem 21 sanačních akcí vytěženo

276.1 tis. m³, po povodních roku 2002 v rámci celkem 16 projektů mezi ř. km 63.1 a 0.0 dalších 190.2 tis. m³ štěrku. Celkem lze dostupná data shrnout do pravděpodobného odhadu celkového množství štěrku a písku odstraněných z popisovaného úseku koryta Berounky od roku 1930 do současnosti v rozmezí 800 až 1200 tis. m³. Tyto vytěžené objemy naznačují, jaká množství hrubě klastického materiálu se ve vodních tocích pohybují. Všechny úseky vytěžené plovoucími bagry do poloviny 60. let 20. století jsou dnes již opět z velké míry zaplněny sedimenty (vlastní mapování dna Berounky autorem článku). Uvedené těžby mají nepochybně vliv i na pozorovanou distribuci strusky. Pokles jejího množství směrem po proudu je tedy důsledkem nejméně tří faktorů:

- ředění valounového materiálu příspěvkem přítoků a erozí materiálu údolní terasy,
- abraze a destrukce valounů,
- průmyslových a sanačních těžeb z koryta řeky.

Bez ohledu na výše uvedené nejistoty lze však jak na základě distribuce valounů strusky, tak i přírodních hornin konstatovat, že fluvialní transport vltavínů (v rozpoznatelné velikosti nad cca 8 mm) ve vodních tocích nemůže být významným faktorem jejich plošné redistribuce na vzdálenosti větší než desítky kilometrů jako horní limit vzdálenosti. Při delším transportu by se zákonitě musely dostat do velikostní frakce velmi drobného štěrku nebo písku, ve kterých je již jejich identifikace v sedimentu velmi nesnadná. Sklo vltavínů navíc podléhá v přírodním prostředí poměrně rychlému rozpouštění, tedy při delším uložení v sedimentu mohou být zrna pískové velikosti rozpuštěna zcela. Ojedinelé kusy samozřejmě mohou být transportovány na velké vzdálenosti zamrzlé v plovoucích krách nebo v kořenových balech při povodni unášených stromů. Tento mechanismus transportu je však natolik málo efektivní, že jím nelze vysvětlovat větší akumulace vltavínů s nálezy většího počtu kusů. Z tohoto pohledu akumulace vltavínů v lužické oblasti v Německu, kdy bylo nalezeno již celkem několik stovek kusů, musí být samostatnou částí (na krátkou vzdálenost transportovaných vltavínů) pádového pole a transport fluvialními procesy z jihočeských lokalit na stovky kilometrů lze považovat za vyloučený (viz také Lange 1996; Lange, Suhr 1999; Trnka, Houzar 2002; kteří došli ke stejnému závěru). Nález chebské části pádového pole, kde je jakýkoliv fluvialní transport vltavínů z dřívě známých oblastí vyloučen, ukázal, že pádové pole primárně pokrývalo mnohem větší plochu (vltaviny Chebska nejnověji zpracovány Skálou et al. 2009; Řandou et al. 2009). O fluvialním transportu vltavínů z jižních Čech do Kobyliš (Žebera 1972) je také možné pochybovat. Vltaviny v Kobyliších byly nalezeny ve velmi hrubozrnném kamenovém až blokovém štěrku s dominancí lokálních silicitů neoproterozoika, pocházejících z nedaleké výšiny Ládví. Zpráva Cílka (1996) o nálezu vltavínu u obce Skryje na Křivoklátsku (ověřeno od G. J. Kukly, který nález v terasových štěrcích Berounky potvrzuje, osobní sdělení 2009), naznačuje existenci další části pádového pole někde v povodí řeky Berounky.

Závěr

V pěti profilech řeky Berounky v posledních 70 km jejího toku mezi obcí Skryje a ústím Berounky do Vltavy u Radotína byla provedena orientační valounová analýza současných akumulací štěrku v korytě řeky. V každém profilu bylo jednotlivě petrograficky určeno 100 největších

valounů ze vzorku o objemu zhruba 30 litrů. U každého valounu byla kromě petrografie (horniny) stanovena i jeho hmotnost a rozměry. U každého vzorku bylo určeno také hmotnostní zastoupení frakcí pod 2 mm, 2 až 16 mm a nad 16 mm.

Po stránce hmotnostní a zejména objemové představuje převažující část současných písčitých štěrků Berounky velikostní frakce nad 16 mm. Pouze tato velikostní frakce byla petrograficky hodnocena. Použitou valounovou analýzou nelze odlišit materiál přímo transportovaný ze zdrojových oblastí jednotlivých hornin od valounů, které byly dočasně uloženy v nivních štěrcích (nebo jiných uloženinách) a později resedimentovány. Ve sledovaném 70 km dlouhém úseku řeky není patrné žádné zřetelné zmenšování velikosti zrna transportovaného materiálu. Medián velikostního rozdělení říčních štěrků je u všech vzorků ve velikostní kategorii 16 až 32 mm.

Ve zkoumaných vzorcích prakticky nebyly zjištěny žádné valouny metamorfovaných (přeměněných) hornin nebo žul z oblasti Šumavy nebo Českého lesa (zjištěn byl jen jeden valoun zvětralého metamorfitu, v profilu Skryje). Pokud se vůbec nějaký hrubý klastický materiál ve valounové frakci, pocházející z horních toků zdrojnic Berounky, pohybuje korytem Berounky i na jejím spodním toku, mohou to být pouze některé valouny křemene, jejichž původ nelze jednoduše určit. Až z horních toků samozřejmě může pocházet materiál v písčité frakci (pod 2 mm), ta ale představuje z uloženin v korytě řeky jen malé procento (ve zkoumaných vzorcích 6.87 až 15.43 % hmot.).

V současném režimu je navíc transport štěrku a písku ze dvou podstatných zdrojnic Berounky vyloučen přehradními nádržemi na Mži (VD Hracholusky) a Radbuze (VD České údolí). Plocha povodí Berounky v profilu Plzeň - Bílá Hora (ř. km 136.9; plocha povodí 4015.6 km²; údaje ČHMÚ) je menší, než plocha povodí od tohoto profilu po ústí Berounky do Vltavy (plocha povodí celé Berounky je 8861.4 km², příspěvek plochy povodí v úseku od Plzně - Bílé Hory po ústí je 4845.8 km², tedy 54.7 % z celého povodí Berounky).

Ve štěrcích Berounky ve všech hodnocených profilech jsou velmi hojné valouny z hornin barrandienského neoproterozoika a barrandienského paleozoika (kambria, ordoviku, siluru a devonu). Z hornin neoproterozoika jsou ve většině sledovaného úseku nejhojnější silicity (buližníky), časté jsou ale i valouny neoproterozoických drob a břidlic a vulkanitů (spilitů), zejména v úseku po Hýskov. Zdrojová oblast těchto hornin je velmi rozsáhlá, zahrnuje celé Plzeňsko, až po Klatovy a většinu vlastního údolí Berounky až po Hýskov.

Z hornin kambria jsou pravidelně zastoupeny slepence a dobře zpevněné pískovce až křemence, které pocházejí z oblastí centrálních Brd (transportovány zejména Klavou a Litavkou), případně z okolí obce Skryje (milečské slepence). Nápadné zvýšení zastoupení těchto hornin je v úseku pod ústím Litavky. Běžně se vyskytují i kambriické vulkanity, pocházející z křivoklátsko-rokycanského pásma, do údolí Berounky jsou dotovány zejména Zbirožským a Úpořským potokem, směrem po proudu od Račic n. B. jejich zastoupení rychle klesá. Počínaje od Hýskova se výrazně zvyšuje podíl hornin ordoviku, zejména křemenců. Ve spodním toku Berounky pod Berounem tvoří souhrn hornin kambria, ordoviku, siluru a devonu, které se vesměs dostávají do toku až v úseku pod Plzní, výrazně nadpoloviční část štěrkové frakce.

Podstatným zdrojem středně a hrubě zrnitého štěrku (nad 16 mm) jsou tedy ve studovaném úseku Berounky lokální horniny, s délkou transportu jen v kilometrech až prvních desítkách kilometrů. Význam mají i antropogenní materiály, které tvoří ve štěrcích v průměru 1 % (lokálně až 10 %). Místní horniny (i antropogenní materiály) se do řečiště dostávají třemi hlavními mechanismy:

- materiálem transportovaným do hlavního toku Berounky jejími stálými přítoky a erozními stržemi občasně protékajícími při přívalových srážkách;
- břehovými nátržemi nivních štěrků Berounky (resp. nátržemi umělých úprav břehů a destrukcemi staveb), tedy rozšiřováním a překládáním koryta; mobilizace a redepozice materiálu z údolní terasy;
- přímým říčením skalních masivů nad řekou, s pádem bloků a suti přímo do toku, nebo pohybem suti do toku.

Vliv malých bočních přítoků i nejrůznějších strží, kterými se vody a klastický materiál pohybují jen po přívalových srážkách, je podstatný. Tyto toky mají totiž podstatně větší spád než Berounka a při přívalových srážkách mají značnou transportní schopnost. Ve většině sledovaného úseku je vyvinut inverzní reliéf, tedy přítoky pramení zpravidla v plochem terénu, a jejich spodní nejvodnatější úseky před soutokem s Berounkou mají větší spád a procházejí reliéfem s velmi strmými svahy. Dokladem transportní činnosti malých přítoků jsou akumulární tělesa při jejich ústí do údolí Berounky. Malých stálých přítoků, pravidelně transportujících štěrku do hlavního údolí, je v úseku od Plzně po ústí Berounky do Vltavy zhruba 200.

Zastoupení železářské strusky v říčních štěrcích velmi strmě klesá směrem po proudu řeky od jejího hlavního zdroje v Nižboře a Hýskově, velikost valounů strusky se zřetelně zmenšuje. Nejdále jsou transportovány valouny s nižší objemovou hmotností (tedy větším podílem bublin). Tento vztah však nemusí platit pro vltaviny, kde jsou naopak kusy s velkým podílem bublin velmi křehké a pravděpodobně nepřežijí delší transport.

Provedená studie naznačuje, že tam, kde se nachází vltavinů poměrně hodně (desítky a více kusů na jedné lokalitě) se s největší pravděpodobností jedná o transport na vzdálenosti do 10 km. Transport velkého množství vltavinů na vzdálenosti vyšších desítek a stovek km (např. z jihočeské oblasti do lužické oblasti) lze považovat za vyloučený a jedná se o samostatné dílčí části pádového pole. Jednotlivý kus ovšem může být transportován na prakticky neomezené vzdálenosti, například zamrzlý v ledu nebo zachycený v kořenech plovoucího stromu. Nález takového jednotlivého kusu, transportovaného tímto mechanismem, je však velmi málo pravděpodobný.

Poděkování

Tento článek byl připraven s podporou projektu GA ČR 205/09/0991. Zdrojová data byla získána v roce 2005 (tedy 3 roky po katastrofálních povodních roku 2002), a to jednak v rámci projektu Grantové agentury AV ČR IAA300130506, a dále v rámci kooperační smlouvy řešené Geologickým ústavem AV ČR pro Fakultu stavební ČVUT v rámci hospodářské smlouvy zadané podnikem Povodí Vltavy, s. p. Za připomínky k počáteční verzi rukopisu děkuji J. Kadlecovi a F. Stehlíkovi a za jazykovou úpravu anglického abstraktu J. Adamovičovi. Za cenné opravy, doplňky a komentáře dvěma recenzentům rukopisu.

Literatura

- Balatka B., Loučková J. (1991): Kvartérní terasy řeky Berounky. - *Sbor. Českoslov. geograf. Spol. (Praha)* **96**, 3, 145-162.
- Barrell J. (1925): Marine and terrestrial conglomerates. - *Geol. Society of Amer. Bull.* **36**, 279-342.
- Bouška V., Faul H., Naeser C. W. (1968): Size, shape and color distribution of moldavites. - *Acta Univ. Carol., Geol.*, **4**, 277-286.
- Bouška V., Kadlec J., Žák K. (1999): Moldavite aus dem westlichen und dem nördlichen Teil Böhmens. - In: 8. Tagung über Moldavite, 22. - 24. 9. 1999 Kamenz, Sachsen. - *Schrift. Staatl. Mus. Mineral. Geol., Dresden* **10**, 16-19.
- Cífková, Horský, Kos, Prchal, Škrov, Uhlíř (1971): A collective work by members of the young astronomer's club at the Public's Observatory in České Budějovice, Flight direction of moldavites and their overall mass. - *Mem. Observ. Czech Astron. Soc. of the Czech Acad. Sci.* **14**, 42-51. Československá astronomická společnost při ČSAV, Praha.
- Cílek V. (1996): Nález vltavínu v říční terase Berounky u Skryjí. - *Speleo (Praha)* **21**, 37.
- Dohnal J., Jáně J., Valenta J. (2003): Geofyzikální výzkum v kvartérní nivě řeky Berounky severně od obce Tetín. - MS, Archiv České geologické služby, Praha.
- Gomez B., Rosser B. J., Peacock D. H., Hicks D. M., Palmer J. A. (2001): Downstream fining in a rapidly aggrading gravel bed river. - *Water Resources Res.* **37**, 1813-1823.
- Hammond C. R. (1950): The chemical composition and some physical characteristics of tektites. - *Popular Astronomy* **58**, 345-350.
- Havlík A., Žák K., Hejduk J. (2005a): Posudek splaveninového režimu Berounky. - MS, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydrauliky a hydrologie, Praha.
- Havlík A., Žák K., Hejduk J., Píček T. (2005b): Splaveninový režim Berounky. - In: Sbor. Konf. Vodní toky 2005 (Hradec Králové, 29. - 30. listopadu 2005), J. Plechatý a S. Chumová (eds.), 20-23. Vodohospodářský rozvoj a výstavba, Praha.
- Kořan J. (1947): Z dějin českého železářství v počátcích kapitalismu. - In.: *Sbor. pro hospodářství a sociální dějiny* **2**, sv. 1-2, 18-48 a 129-167. Historická sekce výzkumného ústavu ÚRO, Praha.
- Krumbein W. C. (1934): Size frequency distributions of sediments. - *J. Sediment. Petrol.* **4**, 65-77.
- Lange J.-M. (1996): Tektite glasses from Lusatia (Lausitz), Germany. - *Chem. Erde - Geochem.* **56**, 498-510.
- Lange J.-M., Suhr P. (1999): Die Lausitzer Moldavite und ihr geologisches Umfeld. - *Schrift. Staatl. Mus. Mineral. Geol. Dresden* (8. Tagung über Moldavite) **10**, 71-99.
- Mills H. H. (1979): Downstream rounding of pebbles: A quantitative review. - *J. Sediment. Petrol.* **49**, 295-302.
- Mol J., Vandenberghe J., Kasse C. (2000): River response to variations of periglacial climate in mid-latitude Europe. - *Geomorphology* **33**, 131-148.
- O'Keefe J. A. (1976): Tektites and their origin. - 1-254, *Developments in Petrology* **4**, Elsevier, Amsterdam.
- Růžičková E., Růžička M., Zeman A., Kadlec J. (2003): Kvartérní klastické sedimenty České republiky, Struktury a textury hlavních genetických typů. - 1-92. Česká geologická služba, Praha.
- Řanda Z., Mizera J., Frána J., Kučera J. (2009): Geochemical characterization of moldavites from a new locality, the Cheb Basin, Czech Republic. - *Meteor. Planet. Sci.* **43**, 461-477.
- Skála R., Strnad L., McCammon C., Čada M. (2009): Moldavites from the Cheb Basin, Czech Republic. - *Geochim. Cosmochim. Acta* **73**, 1145-1179.
- Stehlík F. (2006): Rekonstrukce vývoje holocénní nivy Berounky mezi Černošicemi a Lahovicemi. - MS, diplomová práce, PřF UK, Praha.
- Sternberg H. (1875): Untersuchungen über Längen- und Querprofil geschiebeführender Flüsse. - *Zeitschr. Bauwesen* **25**, 483-506.
- Šťastný V. (2003): Podzemní těžba křtlu v okolí Hrádku u Rokycan. - *Speleo* **37**, 22-23, Praha.
- Trnka M., Houzar S. (2002): Moldavites: a review. - *Bull. Czech Geol. Surv.* **77** (4), 283-302.
- Vandenberghe J. (1995): Timescales, climate and river development. - *Quat. Sci. Rev.* **14**, 631-638.
- Vandenberghe J. (2003): Climate forcing of fluvial system development: an evolution of ideas. - *Quat. Sci. Rev.* **22**, 2053-2060.
- Vandenberghe J., Kasse C., Bohncke S., Kozarski S. (1994): Climate-related river activity at the Weichselian-Holocene transition - a comparative study of the Warta and Maas rivers. - *Terra Nova* **6**, 476-785.
- Včíslová B. (1980): Silur - devon Barrandienu - II. fáze - závěrečná zpráva. - MS, Stavební geologie, Praha.
- Žák K. (2005): Valounová analýza říčních šterků v korytě řeky Berounky a pravděpodobné zdroje valounového materiálu. - MS, knihovna Geologického ústavu AV ČR, Praha.
- Žák K., Bouška V., Kadlec J. (1999): Nález vltavínu ve fluvialních sedimentech Vltavy v pískovně u Jeviněvsí s. od Kralup nad Vltavou. - *Bull. mineral.-petrolog. Odd. Nár. Muz. (Praha)* **7**, 242-243.
- Žák K., Elleder L. (2007): Povodňová historie v krasovém kaňonu řeky Berounky v okolí obce Srbsko v posledních dvou stoletích. - *Čes. Kras* **33**, 9-15.
- Žebera K. (1972): Vltaviny v katastrofálních přívalových sedimentech u Prahy. - *Geol. Průzk.* **14** (2), 54-56.