

# NEOGENNÍ SEDIMENTY KARPATSKÉ PŘEDHLUBNĚ VE VRTECH P1, P2 A M1 ČERNOVICE

Neogene deposits of the Carpathian Foredeep in the drill holes P1, P2 a M1 Černovice

Slavomír Nehyba<sup>1</sup>, Pavla Tomanová Petrová<sup>2</sup>, Petra Jakobová<sup>3</sup>, Otakar Krásný<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ústav geologických věd PřF MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno; e-mail: slavek@sci.muni.cz

<sup>2</sup> Česká geologická služba, Leitnerova 22, 658 69 Brno; e-mail: pavla.petrova@geology.cz

<sup>3</sup> Arcadis Geotechnika a. s., Šumavská 33, 602 00 Brno ; e-mail: krasny@geotechnika.cz

(24-43 Šlapanice)

**Key words:** Carpathian foredeep, Karpatian, Lower Badenian, depositional environment

## Abstract

Karpatian and Lower Badenian deposits were newly exposed by a series of wells in the area of Černovice. Lower Badenian deposits ("Brno sands") were interpreted as deposits of coarse-grained delta. The source area was the "passive" basin margin (the European platform, Brno Massif). The Karpatian strata represent deposits of the inner and outer shelf zone. The source area was the "active" foredeep margin (the Outer Carpathian thrust front).

## Úvod

Stavební aktivita přináší množství průzkumných geologických prací. V některých případech jsou tak odvrtny relativně hluboké vrty. Taková situace nastala při stavebním průzkumu v prostoru tzv. černovických teras, kde bylo v roce 2009 odvrtno 6 inženýrsko-geologických sond do hloubky 28–60 m. Měli jsme možnost detailněji popsat 3 z těchto plně jádrovaných průzkumných děl, které umožnily detailnější poznání neogenních sedimentů v zájmové oblasti. Lokalizace zájmové oblasti i průzkumných děl je prezentována na obrázku 1. Litologický profil nejhlubším ze studovaných vrtů je na obrázku 2.

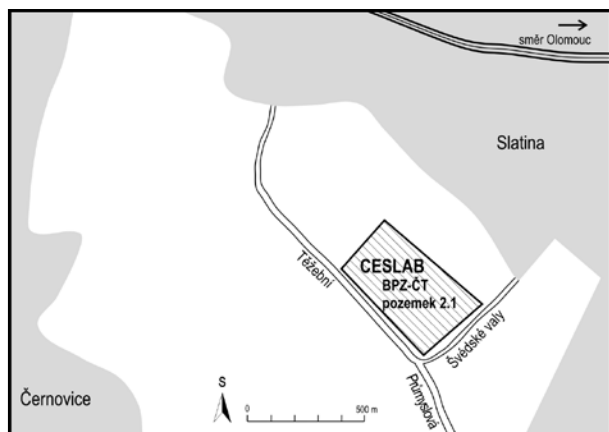
## Nálezová situace

Nejvyšší partie vrtů tvořily navážky a kvartérní sedimenty (sprašové hlíny, sprašové hlíny s hojnými úlomky, fluvialní štěrky tuřanské terasy) o mocnosti 14–16 m. Velikost maximálních klastů byla přes průměr vrtu (nad 10 cm). Orientační petrografická analýza (1 vzorek) hrubé

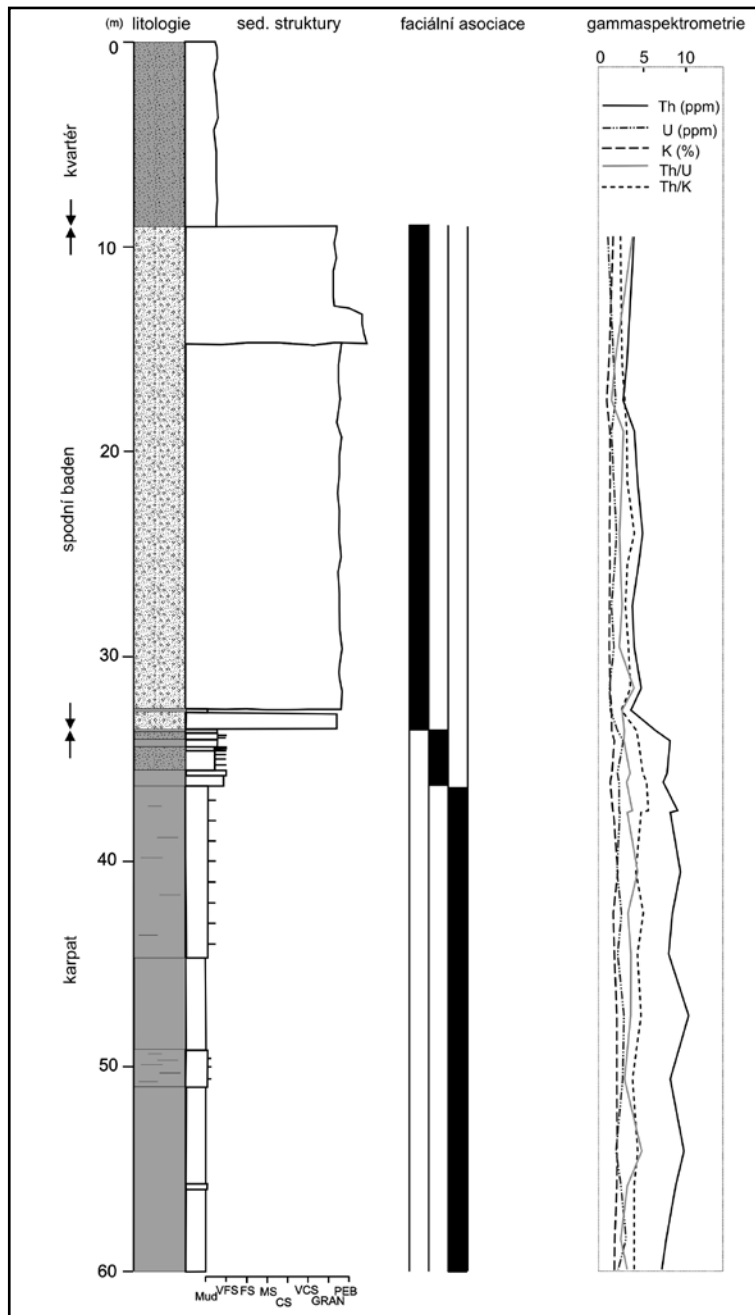
frakce (nad 4 mm) ukazuje na významnou přítomnost pískovců a drob (34,9 %), granitoidů (15,4 %), křemene (15,2 %), dále vápenců (5,4 %), metamorfítů (rul, svorů, kvarcitů a břidlic – 8,7 %), křemen-živcového agregátu (5,2 %). Klasty slepenců a rohovců jsou ojedinělé. Valouny jsou většinou polozaoblené či zaoblené.

V podloží pleistocenních fluvialních štěrků byly zjištěny neogenní sedimenty karpatské předhlubně. V rámci neogenních sedimentů byly vyčleněny tři faciální asociace.

**Svrchní faciální asociaci** představuje světle hnědý až žlutohnědý špatně vytríděný vápnitý písčité štěrk s hojnými valouny do 2 cm, lokálně středostranný až hrubozrnný špatně vytríděný písek s občasnými valouny do 3 cm. Valouny jsou většinou polozaoblené, maximální velikost byla zjištěna 4 cm (výrazně méně než v nadloží). Písky jsou proměnlivě lokálně zpevněny. V rámci písků byly zjištěny jílovité závalky a poblíž báze až 5 cm mocné vločky šedo zeleného vápnitého prachovitěho jílovce. Tyto sedimenty byly klasifikovány jako tzv. brněnské písky spodnobadenského stáří. Mocnost brněnských písků byla velmi proměnlivá od 1 do 18 m a charakteristická je jejich ostrá báze. Orientační petrografická analýza (10 vzorků) hrubé frakce (nad 4 mm) byla prováděna po 1,5–2 m. Výsledky ukázaly určité rozdíly v zastoupení jednotlivých hornin v různé metráži, nebyl však rozlišen jednoznačný trend změny. To lze spojit také s výraznými rozdíly ve velikosti zrn (písek-písek se štěrkem-písčité štěrk). Významná byla přítomnost křemene (25,0–41,7 %), pískovců (4,6–28,5 %), drob (1,0–16,6 %), granitoidů (1,0–26,5 %), vápenců (2,0–37,3 %), rul (1,0–8,7 %), svorů (1,0–16,6 %), rohovců (1,0–9,8 %) a křemen-živcového agregátu (1,0–22,2 %). Klasty slepenců, kvarcitů, amfibolitu, aplitu, arkóz a „sluňáků“ byly ojedinělé. Ve všech vzorcích byla určitá příměs jílovito-prachovitých intraklastů. Valouny jsou většinou poloostrohanné a polozaoblené, byly však



Obr. 1: Lokalizace zájmové oblasti.  
Fig.1: Location of the area under study.



Obr. 2: Litologický profil vrtem P1 Černovice.

Fig. 2: Lithological log of the well P1 Černovice.

zjištěny i dobře zaoblené a ostrohranné. Největší valouny ve vzorcích představovaly obvykle pískovce nebo vápence, ojediněle křemen a jejich velikost se pohybovala od 5 cm do 0,7 cm. Analýza průsvitných těžkých minerálů (3 vzorky, zrnitostní frakce 0,063–0,125 mm) dokladuje naprostou dominanci granátu (64,9–78,5 %). Významnější byla přítomnost staurolitu (5,2–8,4 %), zirkonu (1,7–8,4 %) a disthenu (3,5–6,2 %), ostatní minerály jako apatit, rutil, turmalín, anatas, zoisit-epidot, titanit, spinel, monazit a pyroxen byly přítomny méně často. Zastoupení velmi stabilních minerálů (zirkon, turmalín, rutil) představovalo 4,0–9,9 % a vždy dominoval zirkon. Písky obsahují početně chudé společenstvo foraminifer tvořené zejména mělkovodními bentosními druhy *Lenticulina inornata* (d'Orb.), *Asterigerinata planorbis* (d'Orb.), *Ammonia viennensis*

(d'Orb.), *A. beccarii* (L.), *Porosonion granosum* (d'Orb.), *Heterolepa dutemplei* (d'Orb.), *Bathysiphon* sp., *Ammodiscus* sp., *Globigerinoides trilobus* (Rss.) a dalšími. Ve společenstvu se objevují i taxony z karpátu, např. *Uvigerina graciliformis* Papp et. Turn. (Petrová et al. 1998, Bubík – Petrová 2004). Schránky jsou obvykle špatně zachovalé s poškozenou skulpturací, dokládající horší depoziční podmínky prostředí.

V podloží brněnských písků byla zjištěna **střední faciální asociace** reprezentovaná střídáním lamin až 10 cm mocných vrstev světle žlutého, rezavě hnědého či světle hnědého, ve vyšších partiích středozrného až hrubozrného, k bázi jemnozrného až velmi jemnozrného vápnatého písku a světle žlutohnědého, žlutozeleného, světle šedého či zelenošedého jílovitého vápnatého prachovce jemně písčitého. Písek je relativně dobře vytríděn, ale v některých polohách byla zjištěna přítomnost klastů do 1 cm. Zvrstvení lze charakterizovat jako heterogenní mázdřité či čokkovité. Mocnější vrstvy pískovce pak vykazovaly čeřinové zvrstvení, vzácněji horizontální laminaci. Projevy bioturbace byly ojedinělé. V rámci prachovce naprosto dominuje jemná horizontální laminace. Mocnost této jednotky se pohybuje od 2,7 do 5,8 m. Bylo provedeno celkem 7 zrnitostních analýz (3 z písků a 4 z prachovců). Hodnoty střední velikosti zrna  $M_z$  se pro písky pohybuje od 0,05 do 0,14 mm a prachovce 0,012–0,023 mm. Koeficient vytrídění  $\sigma_I$  (Folk – Ward 1957) byl pro písky zjištěn v rozmezí 2,4–2,6 a pro prachovce v rozmezí 1,5–2,5. To vzhledem k použité technice měření (spodní hranice 0,04  $\mu\text{m}$ ) ukazuje na dobré i horší vytrídění. Vyhodnocené jemnozrné a velmi jemnozrné písky mají samozřejmě dominantní zastoupení písčité frakce (43,9–60,6 %), významný podíl frakce prachovité (27,5–37,0 %) a jílovité (11,9–19,1 %). V rámci prachovců pak na-

opak dominuje prachovitá frakce (70,6–80,9 %), významný je podíl frakce jílovité (15,0–19,1 %). Naopak zastoupení písčité frakce bylo proměnlivé (0–11,4 %) a ojedinělá byla přítomnost drobných klastů do 4 mm, která tvořila 0,3 %. Orientační petrografická analýza (3 vzorky) hrubé frakce (nad 4 mm) ukazuje dominanci vápence (31,6–50 %) nebo křemene (10,5–50 %). Ojediněle byl zjištěn také pískovec, rohovec, droba, křemen-živcový agregát, „sluňák“ a pelitické intraklasty. Maximální klasty o velikosti 0,6–1 cm tvořil křemen nebo vápenec. Klasty jsou obvykle poloostrohranné či polozaoblené. Analýza průsvitných těžkých minerálů (6 vzorků, zrnitostní frakce 0,063–0,125 mm) dokladuje naprostou dominanci granátu (67,0–72,8 %). Relativně stálá byla přítomnost apatitu (1,7–6,8 %), zirkonu (0,6–6,1 %) a rutilu (1,0–6,3 %). Velmi proměnlivé je

zastoupení staurolitu (1,0–16,7 %) a disthenu (3,9–27 %). Ostatní minerály jako turmalín, anatas, zoisit-epidot, monazit, spinel, titanit a andaluzit byly přítomny méně často. Zastoupení velmi stabilních minerálů (zirkon, turmalín, rutil) představovalo 3,9–13,1 % a dominoval zirkon nebo rutil. Prachovec obsahoval relativně bohaté společenstvo foraminifer, jejichž schránky jsou ve srovnání se schránkami ze spodní faciální asociace větší, poměrně dobře zachovalé, procentuální zastoupení planktonu i bentosu je v relativně vyrovnaném poměru. Druhy *Cassigerinella boudecensis* Pok. a *Uvigerina graciliformis* Papp et Turn. indikují zařazení společenstva ke karpátu. Prostředí sedimentace ve vyšším karpátu bylo pravděpodobně příznivější pro život oproti staršímu karpátu (jehož sedimenty byly zachyceny nejvíce vrtem P1), což dokládá vyšší diverzita společenstva, větší schránky a výrazně nižší zastoupení euryoxybiontních druhů a setkáváme se s tímto charakterem foraminiferové fauny i v literatuře (např. Petrová 2004, Cicha – Zapletalová 1974).

**Spodní faciální asociaci** tvoří světle zelenošedý, šedý až modrošedý vápnatý jílovitý prach až prachovitý jíl, dobře vytríděný. Charakteristická je jemná horizontální laminace, případně až střídání lamin či několik cm mocných poloh silněji prachovitých a světle jemně slídnatých a silněji jílovitých. V nejnižších partiích nejhlubšího vrtu P1 byla zjištěna relativně vyšší příměs jemně rozptýlené rostlinné hmoty. Bylo provedeno celkem 13 zrnitostních analýz. Hodnoty střední velikosti zrna  $M_z$  se pohybují od 0,006 do 0,024 mm, koeficient vytrídění  $\sigma_I$  pak v rozmezí 1,3–1,8. To vzhledem k použité technice měření (spodní hranice 0,04  $\mu\text{m}$ ) ukazuje na dobré vytrídění sedimentu. Zastoupení prachovité frakce se pohybovalo od 58 do 80 %, jílovité frakce pak od 14,4 do 42,0 %. Písčítá frakce nebyla obvykle vůbec přítomna, ojediněle se její množství pohybovalo do max. 7,1 % (velmi jemnozrnný písek). Ojedinělá větší zrna (max. 3 mm) byla tvořena angulárními klasty granioidu a křemene. Analýza průsvitných těžkých minerálů (4 vzorky, zrnitostní frakce 0,063–0,125 mm) dokladuje dominanci granátů (31,0–59,5 %), méně často disthenu (0,7–50,6 %). Velmi proměnlivé je zastoupení staurolitu (1,3–25,8 %) i apatitu (1,3–19,1 %). Relativně stálá byla přítomnost amfibolu (2,4–9,7 %). Ostatní minerály jako turmalín, zirkon a zoisit-epidot byly přítomny méně často. Zastoupení velmi stabilních minerálů (zirkon, turmalín, rutil) bylo značně nízké tj. 0–2,4 %.

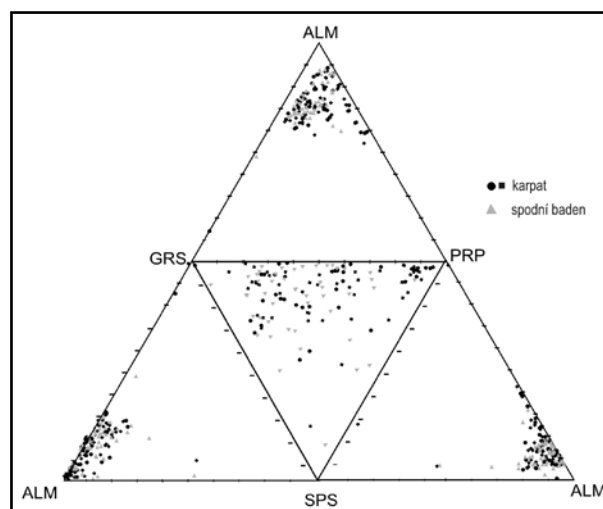
Pelity obsahují relativně bohatou, avšak nepřiliš diverzifikovanou foraminiferovou faunu. Ve společenstvu dominují planktonní druhy typické pro karpát – *Globigerina ottnangiensis* Rögl a *Cassigerinella boudecensis* Pok., dále *Globigerina praebulloide* Blow, *Tenuitellinata angustiumbilocata* (Bolli), *Globigerinella obesa* (Bolli), *Globigerinoides trilobus* (Rss.). Spolu s planktonem se nalézají i schránky bentosních druhů, obývajících prostředí vnějšího, popř. vnitřního šelfu, obvykle tolerující kolísající popř. nižší množství kyslíku ve vodě a běžně se vyskytující v karpátu Centrální Paratethydy (Nehyba – Petrová 2000, Petrová 2004). Jedná se o druhy *Bolivina dilatata* Rss., *B. antiqua* d'Orb., *Hoe-glundina elegans* (d'Orb.), *Globocassidulina oblonga* (Rss.), *Cassidulina laevigata* d'Orb., *Bulimina elongata* d'Orb., *B.*

*schischkinskayae* Sam., *B. striata* d'Orb., *Praeglobulimina pyrula* (d'Orb.), *P. pupoides* (d'Orb.), *Angulogerina* sp., *Nonion commune* (d'Orb.), *Stilostomella scabra* (Rss.), *Hansenisca soldanii* (d'Orb.), *Pullenia bulloides* (d'Orb.), *Pappina breviformis* (Papp et. Turn.) a další.

Výsledky laboratorního gammaspektrometrického studia (26 analýz) ukazují na výrazné změny obsahu přirozených radioaktivních prvků v rámci studovaného profilu neogenními sedimenty. V sedimentech karpátu byly zjištěny vyšší hodnoty všech hodnocených prvků ve srovnání s nadložními sedimenty spodního badenu. V metrži 33,6–60 m se hodnoty Th pohybují v rozmezí 6,47–10,4 ppm, U v rozmezí 2,1–3,15 ppm a K v rozmezí 1,35–2,19 %. Naopak v metrži 9,5 m až 32,6 m se hodnoty Th pohybují v rozmezí 2,83–5,02 ppm, U v rozmezí 1,05–2,08 ppm a K v rozmezí 0,94–1,63 %. Tyto hodnoty ukazují vedle významné změny litologie také na změnu v petrografickém složení těchto sedimentů tedy ve zdrojových horninách.

Vzhledem k naprosto dominantnímu zastoupení granátů v asociacích průsvitných těžkých minerálů byl zhodnocen i jeho chemismus a to 89 analýzami z hornin stáří karpát a 47 z hornin stáří spodního badenu. Dosažené výsledky (obr. 3) ukazují na relativní monotónnost v chemismu granátů u studovaných vzorků. Je zřetelná dominance almandinové (dále ALM) komponenty. V horninách karpátu má 95,5 % zrn obsah ALM složky nad 55 % a průměrné zastoupení ALM složky je 66,8 %. V horninách spodního badenu má 94,1 % zrn obsah ALM složky nad 55 % a průměrné zastoupení ALM složky je 67 %. V některých vzorcích jsou přítomny granáty s vyšším obsahem složky pyropové (PRP), spessartinové (SPS) a grosulárové (GRS). Granáty lze v horninách karpátu klasifikovat ponejvíce jako ALM-PRP (30 %) nebo ALM-GRS (30 %), méně často jako ALM-GRS-PRP (7,7 %) nebo ALM (6,6 %). Ostatní tj. ALM-SPS, ALM-GRS-SPS, GRS, SPS-ALM, GRS, GRS-AND, GRS-ALM byly výjimečné.

Granáty lze v horninách spodního badenu klasifikovat ponejvíce jako ALM-GRS (28,9 %), ALM-GRS-PRP



Obr. 3: Diagram složení granátů studovaných neogenních sedimentů.

Fig. 3: Composition of garnets from studied Neogene deposits.

(20 %) nebo méně často jako ALM-PRP-GRS (15,6 %), ALM-PRP (13,3 %), ALM-GRS-SPS (6,7 %) a ALM (6,7 %). Ostatní granáty, tj. ALM-SPS-GRS, ALM-PRP-SPS, GRS-ALM-PRP a SPS-ALM byly výjimečné. Lze opatrně uvažovat o poněkud širším spektru granátů v případě hornin spodního badenu. Provenienci granátů lze generálně primárně hledat v metamorfovaných horninách, především pak v metapelitech, případně zčásti v granulitech a pegmatitech. Jako velmi nepravděpodobná se jeví provenienci z hornin brněnského masivu. Monotónní asociaci granátů pro sedimenty karpát a podobnou mírně pestřejší asociaci pro sedimenty spodního badenu popisuje Nehyba – Buriánek (2004).

V případě provenienci z metamorfovaných hornin je výhodné studium chemismu rutilu (Force 1980, Zack et al. 2004a, Triebold et al. 2005). Za účelem zjištění provenienci jsou převážně hodnoceny koncentrace Fe, Nb, Cr a Zr (Zack et al. 2004a, Triebold et al. 2005), které jsou ve studovaném případě velmi rozdílné. V případě studovaných šterků bylo analyzováno celkem 10 rutilů z hornin stáří karpát a 18 rutilů z hornin stáří spodního badenu. Koncentrace Fe převyšují ve všech případech hodnoty 1000 ppm, což ukazuje na původ rutilu z metamorfovaných hornin. V rutilech získaných ze sedimentů stáří karpát se koncentrace Nb pohybují v rozmezí 300–1850 ppm (průměr 1037 ppm), koncentrace Cr pak mezi 40 a 200 ppm (průměr 73 ppm) a koncentrace Zr mezi 90 a 1020 ppm (průměr 312 ppm). Hodnoty log Cr/Nb jsou výhradně záporné. Relativně nízká koncentrace Cr a relativně vyšší hodnoty Nb ukazují ve většině případů na původ rutilu z metapelitů (svory, pararuly) a jen ojediněle z metamafických hornin. Hodnoty metamorfni teploty dle Zack et al. (2004b) jsou určeny v relativně velkém rozmezí 533 °C až 875 °C.

V rutilech získaných ze sedimentů stáří spodní baden se koncentrace Nb pohybují v rozmezí 182–2862 ppm (průměr 1043 ppm), koncentrace Cr pak mezi 55 a 1320 ppm (průměr 352 ppm) a koncentrace Zr mezi 15 a 237 ppm (průměr 76 ppm). Hodnoty log Cr/Nb jsou většinou záporné (82,4 %), občas kladné (17,6 %). Kombinace relativně nízkých i vyšších koncentrací Cr i Nb ukazují na původ rutilu jak z metapelitů (svory, pararuly), tak i z metamafických hornin (eklogitů, granulitů). Hodnoty metamorfni teploty dle Zack et al. (2004b) jsou určeny v relativně velkém rozmezí 334 °C až 688 °C.

### Interpretace a diskuze

Fluviální pleistocenní sedimenty poblíž zájmové oblasti vykazují významné rozdíly v jejich provenienci ve srovnání s podložními neogenními sedimenty (Nehyba et al. 2008). Do určité míry lze doložit i rozdíly v provenienci spodnobadenských a karpatských sedimentů v zájmovém prostoru.

Brněnské písky jsou většinou považovány za klastika bazální (Krystek 1974). Dle tohoto autora jsou maximální klasty o velikosti 30–50 cm tvořeny horninami brněnského masivu (obdobně Nehyba et al. 2008). Krystek (1974) popisuje, že bázi brněnských písků tvoří monomiktní klastika a polymiktní písky jsou vyvinuty výše. Ve studovaném případě byly zastiženy pouze polymiktní písky a šterky. Jejich petrografické složení odpovídá výsledkům Krystka (1974). Zdrojovou oblast zde kladl jednak do hornin brněnského masivu, spodnopaleozoických křemenných klastik, devonských i jurských vápenců, ale i do drahanského kulmu a křídových sedimentů s. od Brna. Nepochybně také docházelo ke kanibalizaci starší výplně karpatské předhlubně. Maximální mocnost brněnských písků byla popsána ve vrtu Cf Br 41 a to 193 m. Depoziční prostředí bylo interpretováno jako hrubozrnná delta (Nehyba 2001). Relativně vzácně se vyskytující obvykle mělkovodní druhy foraminifer dokládají transport schránek. Výrazné rozdíly v mocnosti ukazují na významnou roli morfologie při depozici brněnských písků i roli postbadenské eroze.

Vyšší část karpatských sedimentů („střední faciální asociace“) lze na základě strukturních a texturních znaků interpretovat jako sedimenty vnitřního šelfu, kdežto spodní část („spodní faciální asociace“) odpovídá šelfu vnějšímu. Podobné paleoekologické podmínky dokládají i společenstva foraminifer, která navíc indikují prostředí s nižším či kolísavým obsahem kyslíku ve vodě. Přínos hrubšího materiálu i některé sedimentární znaky lze spojit s bouřkovou činností. Určení provenienci je obtížnější, lze předpokládat významnou roli aktivního okraje pánve a pouze doprovodnou roli okraje pasivního (brněnský masiv). Rozdíly v provenienci i faciálním vývoji sedimentů stáří karpát a spodní baden lze spojit s významnou přestavbou sedimentární pánve.

### Poděkování

Studium bylo prováděno v rámci grantu GAČR 205/09/0103. Děkujeme rovněž projektu České geologické služby č. 390003 – Základní geologické mapování území České republiky 1 : 25 000, Brněnsko.

## Literatura

- Bubík, M. – Petrová, P. (2004): Foraminifery brněnských písků ve vrtu Černovice TGB-1. – Geol. výzk. Mor. Slez., 11, 14–17. Brno.
- Cicha, I. – Zapletalová, I. (1974): Stratigrafické problémy mladšího terciéru ve střední části karpatské předhlubně. – Zem. Plyn Nafta, 19, 3, 453–460. Hodonín.
- Folk, R. L. – Ward, W. (1957): Brazos River bar: a study in the significance of grain-size parameters. – J. sed. Petrology, 27, 3–26. Tulsa.
- Krystek, I. (1974): Výsledky sedimentologického výzkumu sedimentů spodního badenu v karpatské předhlubni (na Moravě). – Folia Fac. Sci. Nat. Univ. Purk. Brunensis, Geol., XV, 8, 1–32. Brno.
- Nehyba, S. (2001): Lower Badenian coarse-grained deltas in the southern part of the Carpathian Foredeep (Czech Republic). – Abstracts of IAS Meeting 2001, 97. Davos.
- Nehyba, S. – Petrová, P. (2000): Karpatian sandy deposits in the southern part of the Carpathian Foredeep in Moravia. – Věst. ČGÚ, 75, 1, 53–66. Praha.
- Nehyba, S. – Buriánek, D. (2004): Chemismus detritických granátů a turmalínů – příspěvek k určení provenience jemnozrnných neogenních sedimentů karpatské předhlubně. – Acta Mus. Moraviae. Sci. geol., 89, 149–159. Brno.
- Nehyba, S. – Kirchner, K. – Mackovčín, P. – Demek, J. (2008): Sedimentárně-petrografické studium neogenních a pleistocenních sedimentů v oblasti Brno-Švédské šance. – Geol. výzk. na Moravě a ve Slezsku v roce 2007, 31–35. Brno.
- Petrová, P. (2004): Foraminiferal assemblages as an indicator of foreland basin evolution (Carpathian Foredeep, Czech Republic). – Bulletin of Geosciences, 79, 4, 231–242. Praha.
- Petrová, P. – Novák, Z. – Valeš, V. (1998): Zpráva z výzkumu vrtu Černovice HVI-61. – Geol. výzk. Mor. Slez., 5, 32. Brno.
- Triebold, S. – von Eynatten, H. – Zack, T. (2005): Trace elements in detrital rutile as provenance indicators: a case study from the Erzgebirge, Germany. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 38, 44–145.
- Zack, T. – von Eynatten, H. – Kronz, A. (2004a): Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. – Sed. Geology, 171, 37–58.
- Zack, T. – Moraes, R. – Kronz, A. (2004b): Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. – Contrib. Mineral. Petrol., 148, 471–488.