

# Geologie, paleontologie, speleologie

## Ražba tunelů silničního obchvatu Prahy mezi Lochkovem a Radotínem – výsledky geologicko-paleontologického výzkumu

### Excavation of the Prague by-pass highway tunnel driven between Radotín and Lochkov – results of geological and palaeontological research

Petr Štorch<sup>1</sup>, Jan Černý<sup>2</sup>, Jakub Bohátka<sup>3</sup>, Rostislav Melichar<sup>2</sup>

#### 0. Abstract

*Sedimentary succession and several important tectonic structures temporarily exposed in the highway tunnel north of Radotín near Prague provided a unique opportunity for detailed and multidisciplinary studies on the Upper Ordovician and Silurian formations and Alpine-type Variscan tectonics in the southeastern limb of the Barrandian Prague Basin. Unweathered lower Silurian sediments, rich in stratigraphically important graptolites, have yielded also an excellent material for total organic carbon and carbon isotope analyses. Some parts of the late Aeronian-early Telychian succession are rich in pyrite and undergo rapid decomposition under surface or near surface conditions, hence the subsurface section is of particular significance.*

*The tunnel profile has shown a typical storm-sandstone dominated succession of the Kosov Formation, with sandy diamictite in the basal part and graded quartz-sandstone bank in the upper part which rests upon shale dominated middle part with erosional unconformity. Ordovician-Silurian boundary is marked by appearance of anoxic black shale with abundant graptolites. A thin level with pre-*ascensus* normalograptid fauna was identified in the lowermost few centimeters of the black-shale succession of the lower Silurian Želkovice Formation. Minor change in lithology, marked by sudden onset of sandy-micaceous laminites along with a thin level of phosphatic nodules, indicate an important stratigraphic unconformity situated ca 15 cm above the base of the black shales. Upper part of *A. ascensus* Biozone, as well as *Parakidograptus acuminatus*, *Cystograptus vesiculosus* and *Coronograptus cyphus* zones are missing at this unconformity, graptolite fauna of the *Demirastrites triangulatus* Zone commences with overlying laminites. The tunnel yields also robust data on *Sedgwickii* Event – temporary regression, environmental changes and graptolite mass extinction near the base of *Stimulograptus sedgwickii* Biozone. Subsequent recovery of the graptolite fauna took place in the upper part of the biozone. Massive bed of pale-colored, mottled carbonate mudstone forms the base of the overlying Litohlavy Formation. This marker bed, though barren of any body fossils, is dated by black shale with late *sedgwickii* Zone graptolites below and black shale intercalation with graptolites of the *Rastrites linnaei* Zone above.*

*Stratigraphical sequence was partly duplicated and cut off by strike or transversal faults. Documented stratigraphical repetition could be interpreted as a result of tectonic movements along possible eastern prolongation of two branches of the Očkov fault. The lower fault branch, recognized in the lower part of the tunnel tube, is typical bedding-parallel thrust fault. The upper one was modified by younger transversal fault striking in N–S direction such that the Silurian beds were dragged along and form a narrow tectonic slice. Third significant fault was steep, nearly strike normal fault cutting of a lower part of the Silurian rocks near Lochkov village.*

#### 1. Úvod

Významné inženýrské projekty uskutečňované v posledních desetiletích v Praze a jejím okolí nabízejí jedinečnou příležitost k hlubšímu poznání geologické stavby tohoto území. Rozsáhlé výkopy, a zejména podzemní díla, jsou nenahraditelným zdrojem čerstvých, nezvětralých vzorků. Na rozdíl od vrtných prací mohou v případě potřeby poskytnout téměř neomezené množství studijního materiálu a v neposlední řadě odhalují úložné poměry a tektonické postižení mocných vrstevních sledů.

V rámci výstavby jz. části vnějšího pražského silničního okruhu probíhala v letech 2004–2008 ražba dvou paralelních tunelů mezi Lochkovem a Radotínem (stavba 514 Lahovice–Slivenec, pracovní označení „stavba Lahovská“, obr. 1). V roce 2004 byla nejprve ražena průzkumná štola ve směru od Radotína k Lochkovu v trase tunelu pro stoupací tříproudovou komunikaci. Postup ražby byl sledován podle zpřístupněné geologické dokumentace čeleb a materiálu vyváženého na mezideponii před ústím štoly v Radotíně. V letech 2007 a 2008 byla díky pochopení a spolupráci pracovníků firem ARCADIS Geotechnika, a.s., a PÚDIS, a.s., při postupu prací v obou tunelech dokumentována část geologického profilu a odebírány objemové vzorky. Oba tunely byly raženy v opačném směru než štola, tj. od Lochkova k Radotínu. Velké množství studijního materiálu bylo získáno i z deponie poblíž ústí tunelu jz. od Lochkova.

Hlavní pozornost jsme věnovali kosovskému, želkovickému, litohlavskému a motolskému souvrství (nejvyšší ordovik a spodní silur), které dokumentují dramatické období v historii Země, kdy po velkém zalednění prokázaném z jižní polokoule následovalo prudké oteplení a rozvoj anoxického prostředí v mořích. V černých břidlicích je zachováno množství planktonických graptolitů – vymřelých polostrunatců umožňujících přesné biostratigrafické členění a korelace studovaného vrstevního sledu. Právě možnost rozčlenění vrstevního sledu na krátké, objektivně rozlišitelné časové úseky a korelace s dalšími profily v Barrandienu i v zahraničí jsou výchozí podmínkou studia lokálních i globálních změn

<sup>1</sup> Geologický ústav Akademie věd České republiky, v.v.i., Rozvojová 269, 165 00 Praha 6–Lysolaje; storch@gli.cas.cz

<sup>2</sup> Masarykova univerzita Brno, Přírodovědecká fakulta, Kotlářská 2, 611 37 Brno; 176111@mail.muni.cz, melda@sci.muni.cz

<sup>3</sup> ARCADIS Geotechnika a.s., Geologická 988/4, 152 00 Praha 5; bohátka@arcadisgt.cz

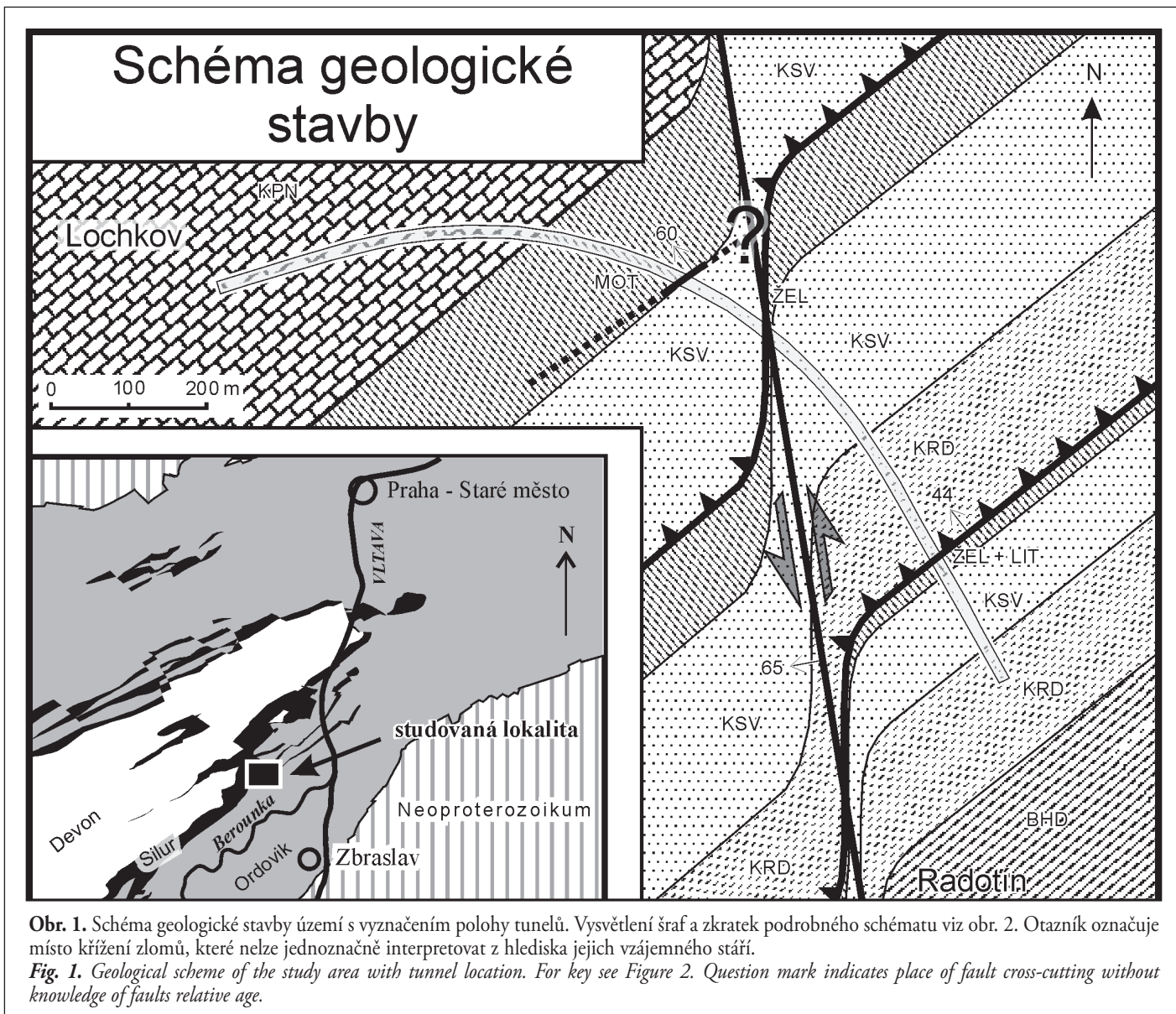
*Poděkování:* Autoři děkují firmám ARCADIS Geotechnika, a.s., a PÚDIS, a.s. za zpřístupnění díla a mezideponie během ražby. Výzkum byl financován Grantovou agenturou České republiky jako součást projektu 205/09/0619.

*Český kras (Beroun), XXXV (2009), 5–13, 11 obr.*

© Muzeum Českého krasu, Beroun

ISSN 1211-1643

ISBN 978-80-903477-4-8



paleoprostředí (transgrese, regrese, změny klimatu, změny organické produktivity a ventilace moří, krize a zotavení fosilních ekosystémů) v daném úseku historie Země. Čerstvé, nealterované horninové vzorky nám v další etapě výzkumu umožní aplikaci náročných chemických a izotopových analýz (poměry stabilních izotopů  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ) a v neposlední řadě i kvalitativní a kvantitativní studium hojných palynomorf.

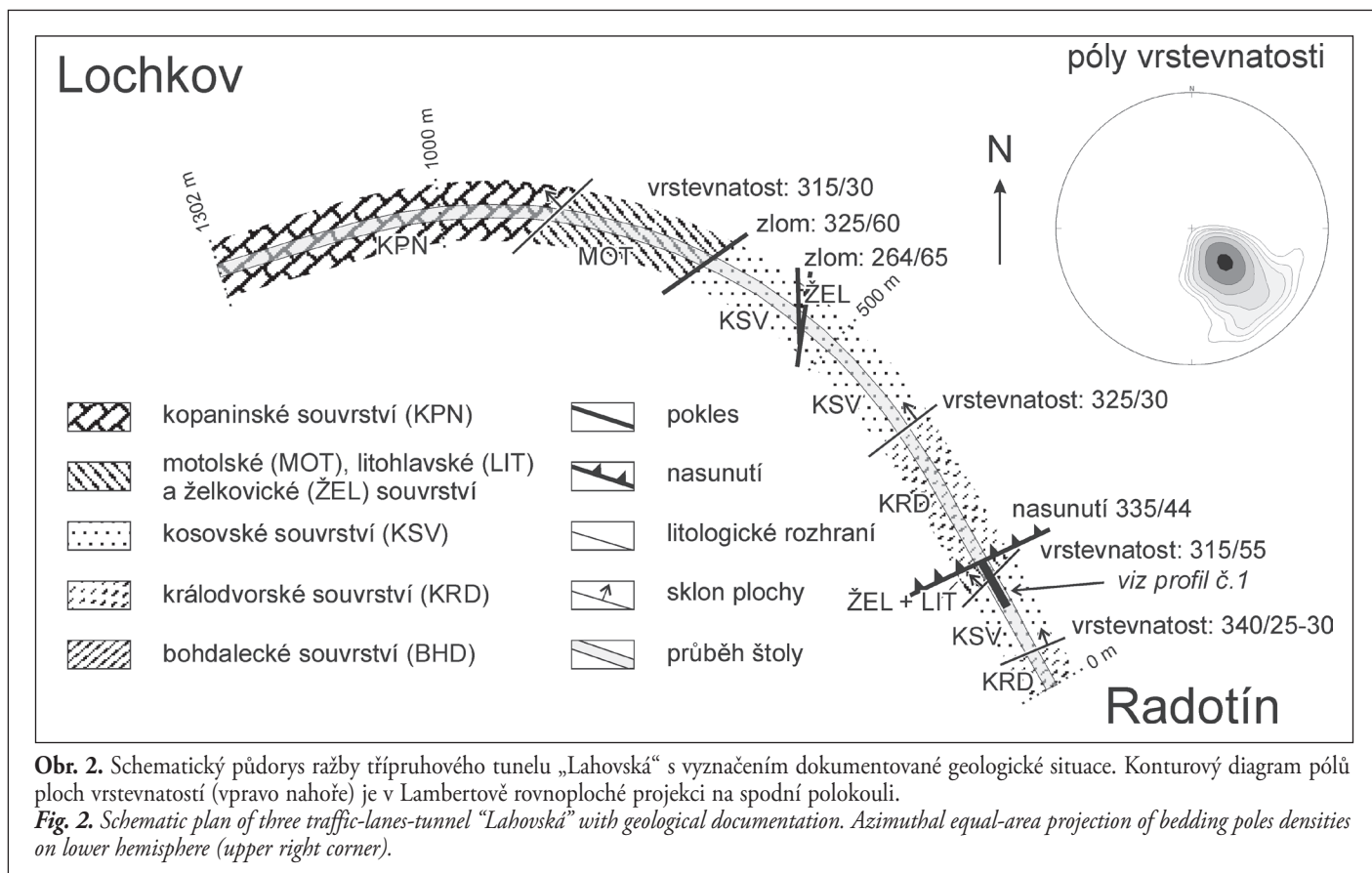
Vedle stratigraficko-paleontologického záznamu však byly podrobně dokumentovány také hlavní tektonické struktury formující geologickou stavbu zájmového území (obr. 1 a 2). Práce, které jsme při ražbě tunelů prováděli, byly svým charakterem srovnatelné se záchranným výzkumem archeologických lokalit. Na rozdíl od archeologického výzkumu probíhal náš terénní výzkum za plného provozu, bez jakéhokoli zdržení stavební činnosti.

## 2. Metodika

Profil byl detailně měřen, vzorkován a dokumentován od svrchní části kosovského souvrství do směrného přesmyku ve spodní části lithlavského souvrství, v pravé mocnosti cca 13 m, v úseku 167–182 m od radotínského portálu (obr. 2). První série 38 vzorků byla odebrána při ražbě kaloty (klenební části tunelu), druhá doplňující série 21 vzorků byla získána při ražbě jádra

(spodní poloviny průřezu tunelu). Další vzorky černých břidlic byly odebrány ze spodní části motolského souvrství. Z každého objemového vzorku („bulk sample“) o hmotnosti 3–6 kg bylo v laboratoři získáno společenstvo graptolitů, které bylo korelováno s biostratigrafickými daty získanými již dříve z mnoha povrchových profilů v různých částech Barrandienu (viz např. ŠTORCH 1994, 2006 a nepublikovaná data). V materiálu, který zbyl po vysbírání určitelných graptolitů, byl v laboratoři České geologické služby analyzován obsah organické hmoty (TOC). V současnosti probíhá studium změn poměrného zastoupení stabilních izotopů  $\text{C}_{\text{org}}$ . Další část každého vzorku slouží ke studiu společenstev palynomorf, která odrážejí změny primární biologické produktivity v tehdejších mořích.

Data z profilu byla podstatnou měrou doplněna studiem materiálu vyvezeného na mezideponii. Téměř neomezené množství graptolitů dobře zachovalých ve velkých blocích břidlic také přispělo k doplnění existující biostratigrafie. Graptoliti jsou předmětem dalšího taxonomického zpracování. Vzhledem k omezenému materiálu odebranému přímo z profilu ražby však byly graptolitové zóny přesto rozlišovány jako „zóny společenstva“, neboť šance na nalezení nejstarších výskytů indexových taxonů graptolitů byla při dané rychlosti postupu ražby tunelu a omezené velikosti odebraných vzorků nepatrná.



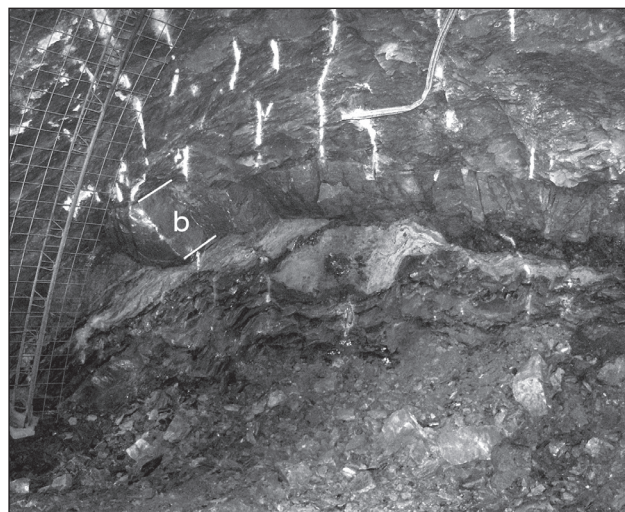
Detailní analýza tektonických struktur byla provedena převážně na základě poskytnuté dokumentace průzkumné štoly od firmy ARCADIS Geotechnika, a.s. Tektonicky významná rozhraní byla při následné ražbě tunelů podrobně dokumentována a z těchto míst byly odebrány orientované vzorky hornin k mikroskopickému ověření směru tektonického pohybu. Strukturální prvky s dalšími doplňujícími údaji byly statisticky zpracovány pomocí programu SpheriStat.

### 3. Geologická stavba odkrytá při ražbě tunelů

Studované území leží v jv. křídle pražské pánve (obr. 1). Vrstvy se zde uklánějí poměrně jednotně k SZ. Průzkumná štola a následně i tunely zachytily ve směru od Radotína k Lochkovu vrstevní sled od královského po kopaninské souvrství, jehož části se tektonicky opakovaly (obr. 2).

Královské souvrství je budováno šedými až zelenošedými jílovitými břidlicemi, které jsou místy rozpukané a v zónách tektonických poruch silně prohnětené. Nad prvním tektonickým zdvojením směrem od radotínského portálu obsahují hodně pelokarbonátových konkrécií. Na puklinách se často objevují limonitové povlaky. Kosovské souvrství je reprezentováno střídáním šedých křemenných pískovců, prachovců a slídnatých břidlic. Ve vložkách a polohách břidlic byly pozorovány tektonické ohlasy paralelní s vrstevními plochami. Spodnosilurská souvrství (želkovické, lithlavské a motolské) jsou tvořena typickými černými graptolitovými břidlicemi. V želkovickém souvrství převažují černé křemité břidlice, lithlavské souvrství je charakterizováno střídáním černých jílovitých břidlic a světlých vápnitých jílovců, v motolském souvrství nastupují tmavě šedé vápnité břidlice. V místech tektonického postižení byly tyto horniny detailně provrášněné a obsahovaly tektonická zrcadla (ohlazy), opět někdy paralelní s vrstevnatostí.

Při ražbě tunelů byly zastiženy tři významné tektonické poruchové zóny (obr. 2) nehlédě na množství drobných dislokací. Jejich lokalizace ve štole je uváděna metrů od portálu štoly v Radotíně. První zastižená porucha (180–200 m od portálu) má charakter vrstevního zlomu, kdy je zlomová plocha prakticky paralelní s vrstevnatostí okolních hornin (obr. 3). Tento zlom způsobil stratigrafickou inverzi, kdy se v nadloží lithlavského



**Obr. 3.** Vrstevní násun s královským souvrstvím v nadloží souvrství lithlavského. Masivní kostkovitě rozpadavá lavice je mylonitizovaná poloha diabasu. 197,4 m od radotínského portálu, třípruhový tunel „Lahovská“.

**Fig. 3.** Bedding-parallel thrust separated Králův Dvůr Formation in hanging wall and Litohlavský Formation in footwall. Massive blocky bank is mylonitized paleobasalt. Location at 197.4 m from Radotín portal, three-traffic-lanes tunnel „Lahovská“.

souvrství objevilo opět souvrství královské. Došlo tedy k tektonickému zdvojení vrstev nejvyššího ordoviku a spodního siluru. Hraníční poloha zelenošedé barvy byla po odkrytí značně pevná a na první pohled masivní. Mikroskopicky bylo možno pozorovat deformační stavby s asymetrickými SC-strukturami a porfyroklastovými systémy indikujícími směr pohybu nadloží k JV. Zřejmě se jedná o mylonitizovaný diabas či diabasový tuf. Tento zlom lze interpretovat jako spodní větev sv. pokračování očkavského zlomu (ČERNÝ 2008).

Druhá významná tektonická porucha (545–554 m od portálu) se projevila vklíněním tektonické šupiny želkovického souvrství do souvrství kosovského. Poruchová zóna byla až 2 m mocná a obsahovala silně prohnětené pískovce, prachovce a břidlice. Zóna se ukláněla poměrně strmě k Z. Porovnáním situace v obou paralelních tunelech bylo možno pozorovat tektonické vyklínování silurské šupiny směrem k J. Podle strukturní situace je nutno předpokládat, že se silur do kosovského souvrství dostal v důsledku dvou tektonických pohybů. Nejprve došlo k tektonickému zdvojení svrchního ordoviku a spodního siluru, zřejmě po vrstevním zlomu srovnatelném s východním pokračováním svrchní větve očkavského přesmyku (ČERNÝ 2008). Pak následoval pohyb po příčné poruše, která se v mapě projevuje levostranným posunutím horninových pruhů (obr. 1). Lze předpokládat, že se při pohybu uplatnila též poklesová složka (ČERNÝ 2008).

Třetí poruchou (604–610 m od portálu) je tektonizovaný styk kosovského a motolského souvrství (obr. 4). Odstrážení část hraníčního sledu (v mocnosti 30–40 m) způsobil poměrně málo

rozsáhlý pohyb na zlomu probíhající sice strměji než vrstvy, avšak směrně téměř paralelně nebo jen velmi mírně kose. Lze předpokládat, že se jako hlavní pohybová složka uplatnil pokles. Vztah k ostatním poruchám nebylo možno zjistit. S ohledem na charakter přízlových deformací se dá očekávat, že se jedná o poměrně mladý zlom.

#### 4. Popis a interpretace zkoumaného vrstevního sledu

Bazální část kosovského souvrství byla zachycena jen v materiálu vyvezeném na přechodné deponii. Nápadné byly bloky tmavošedého, laminovaného hrubozrnného pískovce s roztroušenými valounky a hrubšími klasty. Jedná se o materiál pocházející z 2–3 m mocné hlavní lavice glaciomarinního diamiktitu (viz BRENCLEY a ŠTORCH 1989; ŠTORCH 1990). Jeho převážně plážový materiál přinášely od pobřeží na volné moře driftující ledové kry při sezónním rozmrazání moře periglaciální oblasti během zalednění j. polokoule na konci ordoviku. Sediment se skládá z jemné, jílovito-prachovité frakce, ukládané běžnými sedimentačními procesy v nehlubokém moři mimo dosah bouřkových vln, do které padal nepřilíhlý vytríděný písčité materiál s valounky a klasty uvolňované ze spodku ledových ker putujících od pobřeží.

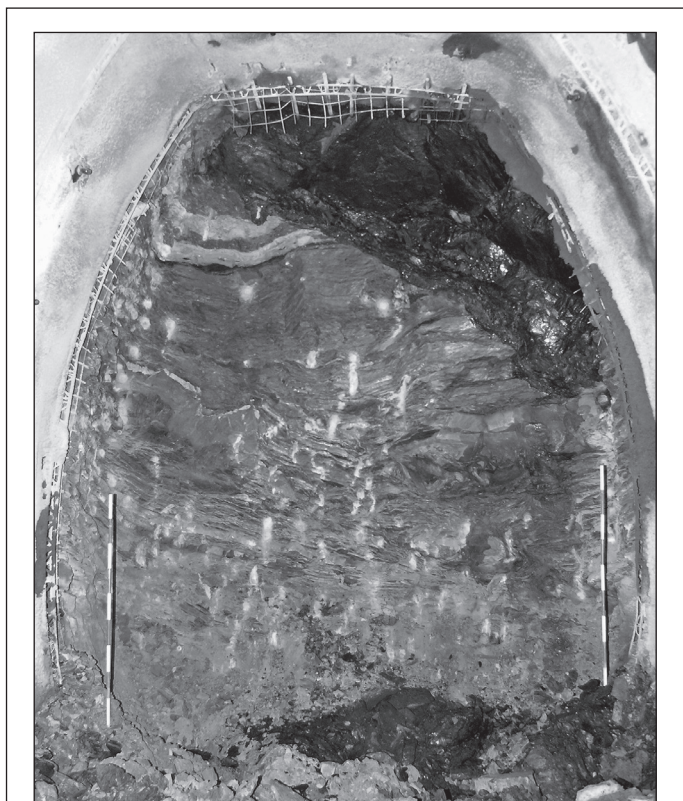
Většinu následujícího vrstevního sledu kosovského souvrství tvoří střídání čistých křemenných pískovců, prachovců a břidlic. Pokračující glacieustatická regrese snížila hloubku barrandienského sedimentačního prostoru až na několik desítek metrů. Materiál křemenných pískovců byl ukládán během prudkých zimních bouří, částečně ze suspenze, částečně trakčními proudy (BRENCLEY a ŠTORCH 1989). Jejich typické křížové zvrstvení (včetně „hummocky cross stratification“) známé z povrchových profilů však většinou nebylo na čerstvém materiálu z tunelu rozeznatelné.

Přesnější orientaci v jinak monotónním sledu kosovského souvrství komplikovalo jeho tektonické porušení a rychlý postup ražby tunelu. Vrstevní sled rekonstruovaný podle popisů čeleb se ale zjevně nelišil od povrchových odkryvů detailně studovaných v oblasti mezi Prahou a Zdicemi (viz BRENCLEY a ŠTORCH 1989; ŠTORCH 2006).

Svrchní část kosovského souvrství typicky začíná lavicí gradačně zvrstveného pískovce až konglomerátu s erozní bází. Také v radotínském tunelu byla zastížena asi 4 m mocná lavice křemenného pískovce s výraznou erozní bází. Lavice začíná asi 10 cm mocnou polohou polymiktického konglomerátu s gradačním přechodem do pískovce. Valouny dosahovaly velikosti 2–3 cm. Sediment byl interpretován jako poměrně proximální tempestit, uložený v mělkém prostředí s vysokou unášecí schopností bouřkových vln v období vrcholící glacieustatické regrese (ŠTORCH 2006). Zbytek mocnosti lavice tvoří masivní křemence, které značně ztěžovaly postup ražby. Většina zbývajících částí kosovského souvrství je tvořena střídáním deskovitých pískovců s vložkami prachovců a břidlic.

V roce 2007 byl při ražbě třípruhového tunelu zvláště detailně dokumentován profil hraníčními polohami ordoviku a siluru v metráži 167–182 měřené od radotínského portálu (obr. 5). Ten zahrnoval nejvyšší část kosovského souvrství, želkovické souvrství a spodní část lithlavského souvrství a byl ukončen přesmykem.

V nejvyšší části kosovského souvrství rychle mizí polohy křemenných pískovců. Poslední 10 cm mocná poloha křemence (bouřkového pískovce) byla zastížena 130 cm pod bází siluru a poslední tenké polohy slídnatých prachovců vymizely asi 80 cm pod touto bází. Posledním metr kosovského souvrství tvoří slídnaté, mírně vápnité masivní břidlice. Hirnantiová fauna, známá z některých barrandienských profilů hranic ordovik/silur (ŠTORCH 1986), zde nebyla nalezena. V nejvyšší poloze jsou jen nehojné bioturbace – průlezné chodbičky v ne zcela zpevněném sedimentu



**Obr. 4.** Tektonický kontakt motolského (nadloží) a kosovského souvrství (podloží) v důsledku pohybu na poklesovém zlomu. Převzato z geologické dokumentace průzkumné štol. 606,5 m od radotínského portálu. Foto Lucie Bohátková.

**Fig. 4.** Tectonic contact of Motol Formation (hanging wall) and Kosov Formation (footwall) along normal fault. Geological documentation of pilot gallery, located at 606.5 m from the Radotín portal. Photo by Lucie Bohátková.

posléze částečně vyplněné pyritem. Vlastní hranice ordovik/silur, totožná s hranicí kosovského a želkovického souvrství, je charak-

terizována ostrým nástupem černých břidlic (obr. 6 a 7) s graptolity. Obsah organické hmoty (TOC) skokově narůstá z hodnoty 0,3 % v nejvyšší poloze ordoviku na 2 % na bázi siluru.

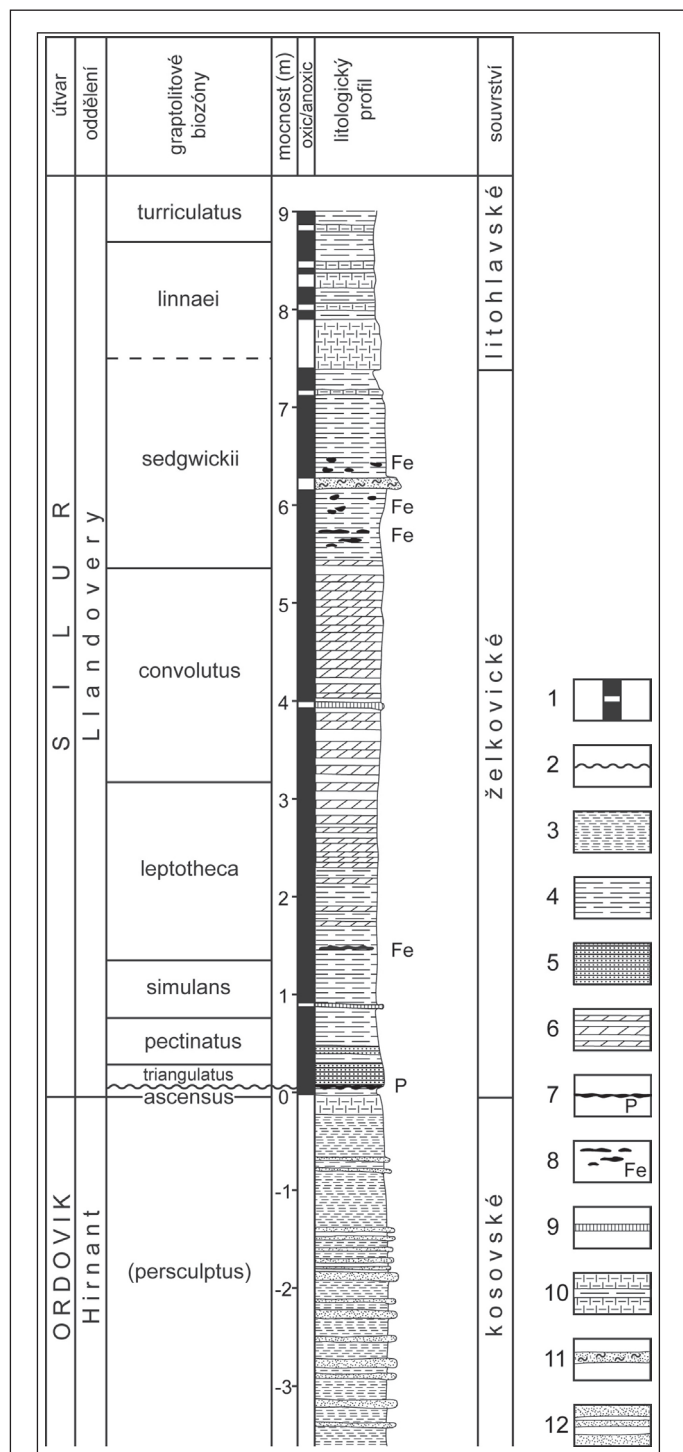
První centimetry jemných černých břidlic želkovického souvrství obsahují druhově chudé společenstvo normalograptů s *Normalograptus normalis* (Lapworth) *sensu* LOYDELL (2007), *Normalograptus angustus* (Perner) a *Normalograptus cf. transgrediens* (Waern).

Asi 10 cm nad bází se již objevuje *Neodiplograptus lanceolatus* Štorch et Serpagli a zonální vůdčí druh *Akidograptus ascensus* Davies.

Dvacet centimetrů nad bází černých břidlic dochází k další změně litologie. Jemné černé břidlice jsou vystřídány černými slídnatopísčity laminity s množstvím graptolitových rhabdosomů. TOC se pohybuje mezi 4 a 7 %.

Při bližším zkoumání se ukázalo, že ostrá hranice mezi jemnými břidlicemi a laminity je stratigrafickou diskordancí (obr. 8). V nejnižší poloze laminitů byli nalezeni graptoliti zóny *Demirastrites triangulatus* (spodní část středního llandovery, stupně aeron). V důsledku přerušení sedimentace zde chybí svrchní část graptolitové biozóny *Akidograptus ascensus* a biozóny *Parakidograptus acuminatus*, *Cystograptus vesiculosus* a *Coronograptus cyphus* (tj. převážná část spodního llandovery, stupně rhuddan). Diskordance je zvýrazněna i výskytem plochých fosforitových konkréci. Přítomnost stratigrafické diskordance těsně nad bází siluru není překvapením, neboť různé dlouhé přerušení sedimentace bylo nad bází siluru zaznamenáno na většině barrandienských profilů (ŠTORCH 1986, 2006), nejbližší na profilu Barrandovy „kolonie Haidinger“ na svazích nad železniční tratí mezi Radotínem a Velkou Chuchlí (ŠTORCH 1986). K přerušení sedimentace došlo podle ŠTORCHA (2006) v důsledku eustatického poklesu hladiny moře během svrchní části zóny *Par. acuminatus*. Lokální rozmyvy nezpevněného sedimentu způsobily, že na některých profilech chybí i samotná báze siluru. Tento proces se odehrával v poměrně hlubokém moři, stále mimo dosah vlivu bouřkových vln. Na profilech v centrální části pánve u Velké Ohrady a Nové Vsi chybí v důsledku nesedimentace celé želkovické souvrství (stupně rhuddan, aeron) a báze lithlavského souvrství je stratigraficky výše, než na profilech s kontinuální sedimentací (ŠTORCH 1986, 2006).

Černé slídnatopísčité laminity tvoří v profilu radotínského tunelu celou mocnost biozóny *Dem. triangulatus* (asi 20 cm) a postupně vyznívají v následující zóně *Demirastrites pectinatus* (mocnost asi 50 cm). Sedimentace pokračuje deskovitě odlučnými, jemně slídnatými graptolitovými břidlicemi zóny *Demirastrites simulans* (mocnost 55 cm) a spodní části zóny *Pribylograptus leptotheca* (1,9 m; viz profil na obr. 5). Bohaté graptolitové fauny (obr. 9) odpovídají ostatním známým profilům, na kterých byly stratigraficky vyhodnoceny BOUČKEM (1953) a ŠTORCHEM (1994) –

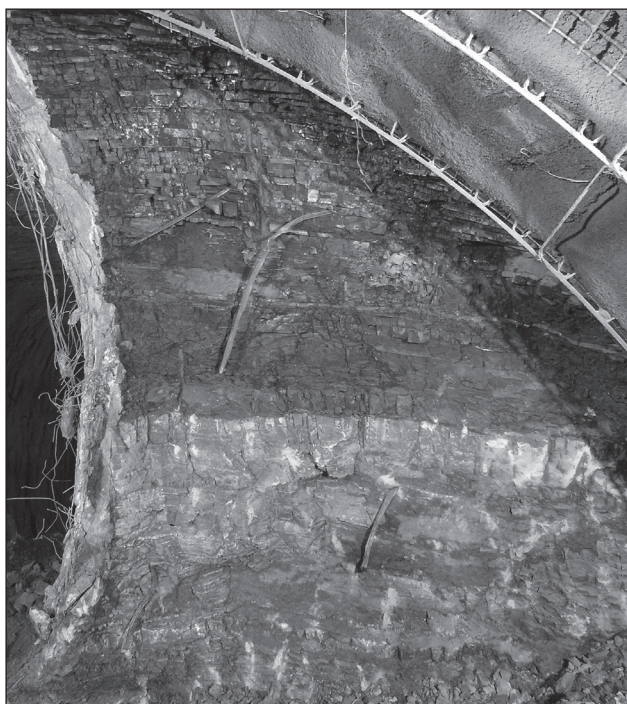


**Obr. 5.** Litologický a stratigrafický profil od nejvyšší části kosovského souvrství do spodní části lithlavského souvrství, podrobně dokumentovaný v kalotě třípruhového tunelu (viz profil č. 1 na obr. 2).

1 – oxické (bílá barva) a anoxické (černá barva) sedimenty; 2 – stratigrafická diskordance při bázi želkovického souvrství; 3 – šedé slídnaté břidlice a prachovce; 4 – černé graptolitové břidlice; 5 – černé slídnato-písčité laminity; 6 – střídání černých prachovitých silicitů a křemičitých břidlic; 7 – poloha fosforitových konkréci; 8 – konkrce a čočkovité polohy pyritu; 9 – vložky bioturbovaného sparitického vápence; 10 – světlé vápnité jílovce až prachovce, v lithlavském souvrství střídání s černými jílovitými břidlicemi; 11 – poloha bioturbovaného slídnatého prachovce ve spodní části zóny *sedgwickii*; 12 – vrstvy bouřkových křemenných pískovců v kosovském souvrství.

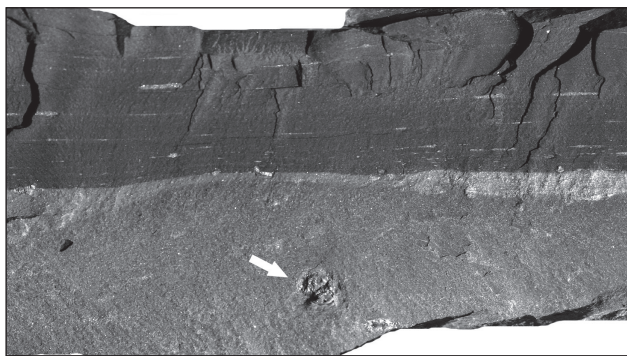
**Fig. 5.** Stratigraphic log comprising the uppermost Kosov Formation, Želkovice Fm. and lower Lithlav Fm.; measured in the three-traffic-lanes tunnel (Section 1 in schematic plane on Fig. 2).

1 – oxic (white) and anoxic (black) sediments; 2 – stratigraphic unconformity above the base of the Želkovice Fm.; 3 – grey micaceous shales and siltstones; 4 – black graptolitic shales; 5 – black sandy-micaceous laminites; 6 – interchanging black silty silicites and siliceous shales; 7 – thin layer of phosphatic nodules; 8 – pyrite nodules and lenticular beds; 9 – mottled sparitic limestone intercalations; 10 – pale-coloured mudstones and siltstones, greenish mudstones interchange with black clayey shales in the Lithlav Fm.; 11 – mottled micaceous siltstone in the lower part of the *sedgwickii* Biozone; 12 – storm sandstone beds in the Kosov Fm.



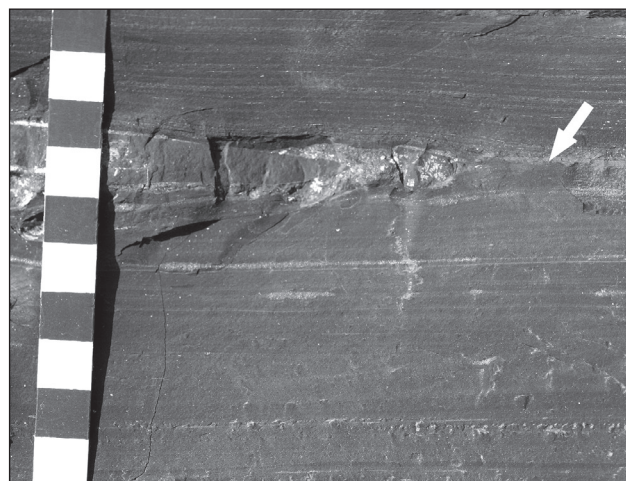
**Obr. 6.** Hranice ordoviku (světlé břidlice a prachovce nejvyšší části kosovského souvrství) a siluru (černé graptolitové břidlice želkovického souvrství). Změna barvy na hranici obou útvarů indikuje nástup anoxické sedimentace v období kulminující postglaciální transgrese. 168,2 m od radotínského portálu. Foto Jakub Bohátka.

**Fig. 6.** Ordovician/Silurian boundary beds (pale-colored mudstones and siltstones of the uppermost Kosov Formation and black graptolitic shales of the Želkovice Formation). Abrupt change in sediment color, indicates an anoxic event which accompanied culmination of the post-glacial rise of sea-level. Location at 168.2 m from the Radotín portal. Photo by Jakub Bohátka.



**Obr. 7.** Detail hranice ordovik – silur. Ostrý, ale více-méně konkordantní styk světlého vápenného prachovitého jílovce nejvyšší části kosovského souvrství s černou jílovitou břidlicí na bázi želkovického souvrství. Prachovitý jílovec obsahuje průlezné chodbičky (bílá šipka) indikující ichnospolečentvo s *Glossifungites*. Foto Petr Štorch.

**Fig. 7.** Ordovician/Silurian boundary close-up. Sharp but rather conformable interface between pale-colored calcareous mudstone of the uppermost Kosov Formation and basal black shale of the Želkovice Formation. The mudstone exhibits prominent burrows referable to *Glossifungites* association. Photo by Petr Štorch.



**Obr. 8.** Stratigrafická diskordance (bílá šipka) a sekvenční hranice při bázi želkovického souvrství, na které chybí téměř celý stupeň rhuddan (graptolitové biozóny *cyphus*, *vesiculosus*, *acuminatus* a svrchní část zóny *ascensus*), se litologicky projevuje pouze tenkou polohou fosforitových konkrecí a nástupem slídnato-písčitých laminitů. Foto Petr Štorch.

**Fig. 8.** Almost complete Rhuddanian succession (*cyphus*, *vesiculosus*, *acuminatus* and upper part of *ascensus* graptolite biozones) is missing at stratigraphic unconformity and sequence boundary (indicated by white arrow) just above the basal bed of the Želkovice Formation. The unconformity is marked by a thin layer of phosphatic nodules and sudden onset of sandy-micaceous laminites. Photo by Petr Štorch.



**Obr. 9.** Typicky zachovalé rhabdosomy vřůdčího druhu *Demirastrites simulans* (Pedersen) v pevných deskovitých břidlicích stejnojmenné biozóny. Bílé grafické měřítko odpovídá délce 5 mm. Foto Petr Štorch a Josef Brožek.

**Fig. 9.** Typical mode of graptolite preservation in solid, platy black shale exemplified by rhabdosomes of the zonal index species *Demirastrites simulans* (Pedersen). White bar equals 5 mm. Photo by Petr Štorch and Josef Brožek.

např. profily Černošice a Hlásná Třebaň. Ve spodní části zóny *D. simulans* však byla v námi zkoumaném profilu překvapivě zjištěna 3 cm mocná poloha světlého, silně bioturbovaného sparitického vápence. Obdobná, 4–5 cm mocná vápencová poloha (obr. 5) zde byla nalezena ve střední části biozóny *Lituigraptus convolutus*. Pro

vyšší část biozóny *Pr. leptotheca* a biozónu *L. convolutus* (mocnost 2,1 m) je typické střídání černých deskovitých křemitých břidlic a prachovitých silicitů. Obsah TOC se pohybuje od 3,5 do 5,5 %. Graptoliti jsou v těchto sedimentech nesmírně hojní a dobře zachovalí. Společentva jsou totožná s faunou popsanou ŠTORCHEM (1999) z Tmaně u Berouna. V některých případech lze zřejmě korelovat mezi oběma lokalitami i jednotlivé vrstevní plochy se zcela typickou litologií a asociací i zachováním graptolitů.



**Obr. 10.** Svrchní část želkovického souvrství a spodní část lithlavského souvrství odkryté v čelbě třípruhového tunelu. Poloha bioturbovaného prachovce ve spodní části graptolitové zóny *Stimulograptus sedgwickii* je označena číslem 1. Bázi lithlavského souvrství tvoří poloha světlého, zelenavého, vápnitého jílovce bez graptolitů (poloha č. 3). Černé břidlice (č. 2) těsně pod touto jílovcovou polohou jsou datovány graptolity svrchní části zóny *St. sedgwickii*. V prvních černých vložkách nad jílovcem (č. 4) nastupuje fauna zóny *Rastrites linnaei*. Uprostřed čelby je zastíženo těleso průzkumné štoly „Lahovská“ z roku 2004. Světlo na konci štoly je z portálu u Radotína. Metráž 181,0 m od radotínského portálu. Foto Jakub Bohátka.

**Fig. 10.** Upper Želkovice Fm. and lower Litohlav Fm. exposed in the face of the three traffic lanes tunnel. No. 1 designates mottled micaceous siltstone bed in the lower part of *Stimulograptus sedgwickii* Biozone. Massive bed of pale-colored, mottled carbonate mudstone, without graptolites, forms the base of the Litohlav Fm. (no. 3). Black shale (no. 2) immediately below the pale-colored basal mudstone is dated by graptolites to the uppermost *sedgwickii* Biozone. *Rastrites linnaei* Biozone assemblage appears in the black-shale intercalations just above the basal mudstone. Former exploration gallery, driven in 2004, was encountered in the middle part of the tunnel face. Light at the end of the tunnel comes from Radotín portal. Located 181.0 m from the Radotín portal. Photo by Jakub Bohátka.

Zvláštní pozornost byla při výzkumu věnována následující části profilu, která odpovídá graptolitové biozóně *Stimulograptus sedgwickii* (mocnost 2,1 m). Prachovité silicity jsou poměrně náhle vystřídány slídnatými černými břidlicemi s množstvím pyritových konkrécií. Vyskytují se jak ploché amébovitě konkréce, tak kulovité framboidální pyrit nebo celé čočkovité vrstvy. Masový výskyt raně diagenetického pyritu vysvětluje, proč je tak obtížné studovat tuto část vrstevního sledu na výchozech či přípovrchových profilech. Břidlice jsou obvykle na povrchu oxidací pyritu úplně rozloženy. Pyrit je nahrazen limonitem, sádrovcem a případně dalšími síraný.

Období biozóny *St. sedgwickii* – nejvyšší graptolitové zóny středního llandovery (stupně aeron) – bylo časem výrazných globálních změn (MELCHIN, KOREN'a ŠTORCH 1998; LOYDELL 1998). Došlo k poklesu hladiny moře, změnám primární produktivity a vymírání graptolitů jako primárních konzumentů. Velmi bohatá fauna středního aeronu byla ve spodní části zóny *St. sedgwickii* vystřídána podstatně chudším společenstvem. Podrobnější scénář těchto změn je předmětem dalšího výzkumu.

Hraniční polohy zón *L. convolutus* a *St. sedgwickii* jsou v námi studovaném profilu (obr. 5) charakterizovány úbytkem graptolitů a přítomností několika světlejších poloh s chondrity. Hranice biozón byla určena jen orientačně. Chudé společenstvo je tvořeno zejména druhy uváděnými ŠTORCHEM (2001) z tufticko-karbonátové facie středního Llandovery u Hýskova: *Petalograptus clandestinus* Štorch, *Pristiograptus regularis solidus* Přibyl, *Campograptus lobi-*

*ferus* cf. *harpago* (Törnquist), *Torquigraptus magnificus* (Přibyl et Münch), *Lituigraptus* cf. *pulcherrimus* (Manck). Na rozdíl od lokality Hýskov zatím nebyl nalezen *Neolagarograptus tenuis* (Portlock). Vlastní vůdčí druh *Stimulograptus sedgwickii* (Portlock) se v našem profilu objevil těsně pod ojedinělou, 15 cm mocnou polohou šedého, silně bioturbovaného slídnatého prachovce až jemnozrnného pískovce (obr. 10). Ve střední části zóny společenstva *St. sedgwickii*, v nadloží prachovce, byla zjištěna typická asociace známá z ostatních výskytů biozóny v Barrandienu (viz ŠTORCH 1994). Graptoliti jsou ve slídnatých černých břidlicích v nadloží prachovce velice hojní. Převládá *Metaclimacograptus ?hughesi* (Nicholson), *St. sedgwickii*, *Torquigraptus involutus* (Lapworth), *Pristiograptus regularis* (Törnquist), *Spirograptus andrewsi* (Sherwin) a *Parapetalolithus praecedens* (Bouček et Přibyl). Jedna vrstevní plocha byla pokryta rhabdosomy jinde vzácného *Cephalograptus extrema* Bouček et Přibyl. Pyrit je přítomen ve formě drobných framboidů, obsah TOC činí 5–7 %. Ve svrchní část biozóny je 3 cm mocná vložka světlého, zelenavého vápnitého jílovce. V nejvyšších 10 cm mocnosti nastupují jemné, jílovité břidlice, charakterizované hojným výskytem „*Rastrites*“ *rastrum* (Richter), spolu s *Rastrites schaueri* Štorch et Loydell, *Torquigraptus* cf. *denticulatus* (Törnquist) a dalšími druhy. Toto společenstvo uvádí také BOUČEK (1953) ze Želkovic. Odpovídá přibližně zóně *Stimulograptus halli* definované LOYDELLEM (1991) v nejvyšším středním llandovery Walesu. V Barrandienu není zóna *St. halli* rozlišována, protože



**Obr. 11.** Pyritizované rhabdosomy druhů *Streptograptus plumosus* (Baily), *Torquigraptus planus* (Barrande), *Torquigraptus involutus* (Lapworth) a *Spirograptus guerichi* (Loydell, Štorch et Melchin), zóna *Rastrites linnaei* v první vložce černé jílové břidlice nad bazálním jílovcem lithlavského souvrství. Bílé grafické měřítko odpovídá délce 10 mm. Foto Petr Štorch a Josef Brožek.

**Fig. 11.** Pyritized rhabdosomes of the species *Streptograptus plumosus* (Baily), *Torquigraptus planus* (Barrande), *Torquigraptus involutus* (Lapworth) and *Spirograptus guerichi* (Loydell, Štorch and Melchin) from *Rastrites linnaei* Biozone. First black-shale intercalation above the basal pale mudstone of the Lithlavsky Formation. Scale bar is 10 mm. Photo by Petr Štorch and Josef Brožek.

většina její mocnosti je zřejmě zastoupena bazálním jílovcem lithlavského souvrství, který je zcela bez fosilií.

Ve sledovaném profilu (obr. 5) netvoří bazální jílovec lithlavského souvrství (viz KŘÍŽ 1975) jedinou mocnou lavici, jako je tomu na klasické lokalitě u Lithlavské nádrže. Hlavní polohu představuje 48 cm mocný masivní vápnitý jílovec až prachovec světle šedozelené barvy ostře oddělený odpodloží i nadloží (obr. 10). Následuje 6 cm mocná vložka černé jílovité břidlice s graptolity zóny *Rastrites linnaei* (např. *Parapetalolithus* cf. *hispanicus* (Habermelner), *Torquigraptus obtusus* (Schauer) a *Spirograptus guerichi* Loydell, Štorch et Melchin). Je zřejmé, že báze zóny *R. linnaei*, která přibližně odpovídá bázi svrchního llandovery (resp. stupně telych), leží někde uvnitř jílovcové polohy.

Vložka černé břidlice pozvolna přechází do nadloží do dalšího, zhruba 15 cm mocného světlého jílovce. Profil pokračuje černou břidlicí (13 cm) s minimem graptolitů. Výše byl zastížen světlý zelenavý jílovec (28 cm), uprostřed s laminovanou tmavošedou břidlicí se *Stimulograptus halli* (Barrande) a *Torquigraptus planus* (Barrande). V nadloží této polohy, kterou ještě řadíme k bazálnímu jílovcu, je 30 cm černé jílovité břidlice s velmi dobře, v reliéfu zachovalými pyritizovanými graptolity zóny *R. linnaei*: *Parapetalolithus elongatus* (BOUČEK et PŘIBYL), *T. planus*, *Streptograptus plumosus* (Baily), *S. guerichi*, *Rastrites linnaei* Barrande aj. Následuje 4 cm mocná vložka světlého jílovce a výše břidlice s graptolitovou faunou odpovídající patrně již zóně *Spirograptus turriculatus* – *Spirograptus turriculatus* (Barrande) vel. *S. guerichi*, *Streptograptus exiguus* (Lapworth) aj.

Další vrstevní sled siluru je ukončen směrným přesmykem. Břidlice jsou silně deformovány s řadou tektonických zrcadel, která částečně využívají vrstevní plochy. Za přesmykem byly ražbou tunelu zastíženy břidlice královského souvrství svrchního ordoviku. Vrstevní sled pokračoval v profilu ražby (obr. 2)

tektonicky zdvojeným královským a kosovským souvrstvím s vklíněnou silně tektonizovanou šupinou želkovického souvrství (545–554 m od radotínského portálu). Následující pruh kosovského souvrství byl směrem do nadloží ukončen dalším zlomem (604–610 m od portálu), za nímž následovaly nezřetelně laminované, slabě vápnité břidlice spodní, llandoveryské části motolského souvrství. Biostratigraficky odpovídají tyto břidlice svrchní polovině mocné graptolitové biozóny *Oktavites spiralis*. Byly nalezeny druhy *Oktavites spiralis* (Geinitz), *Pristiograptus praedubius* (Bouček), *Monograptus novaki* Bouček, *Monograptus praecedens* Bouček, *Monoclimacis geinitzi* (Bouček), *Monoclimacis linnarssoni* (Tullberg), „*Streptograptus*“ *speciosus* (Tullberg), *Diversograptus pergracilis* (Bouček), *Diversograptus ramosus* Manck, *Torquigraptus flagellaris* Törnquist. Posledně jmenovaný taxon byl dosud znám jen ze spodní části biozóny.

V obdobných břidlicích bylo na přechodné deponii u ústí tunelu zjištěno také společenstvo graptolitů následující biozóny *Cyrtograptus lapworthi*. Hranici polohy llandovery a wenlocku na výspě chyběly. Jejich nepřítomnost může být způsobena tektonickým porušením profilu. Vzhledem k úložným poměrům na ostatních profilech hranic llandovery/wenlock v Barrandienu je delší přerušení sedimentace téměř vyloučeno.

Bloky laminovaných vápnitých břidlic s graptolity zóny *Cyrtograptus murchisoni*, hojně nalézané na deponii u ústí tunelu, již náležely spodnímu wenlocku. Svrchní část této biozóny představují polohy s velice hojnými, mírně esovitě prohnutými rhabdosomy *Euroclimacis adunca* (Bouček), doprovázenými druhy *Streptograptus*? *flexuosus* (Tullberg), *Barrandeograptus pulchellus* (Tullberg) a *Cyrtograptus bohemicus* Bouček. Druhově podstatně ochuzená graptolitová fauna následujících poloh je charakteristická velmi hojným graptolitem *Euroclimacis radotinensis* Bouček, který se již vyskytuje spolu s *Monograptus firmus* Bouček. V důsledku masového vymírání na konci biozóny *Cyrtograptus murchisoni* (tzv. *murchisoni* Event – ŠTORCH 1995) vymizely větvené rhabdosomy rodů *Cyrtograptus* a *Barrandeograptus*, dvojřadý síťovitý *Retiolites*, druhy rodů *Mediograptus* a *Monoclimacis*, i řada druhů rodu *Monograptus*. Vrstevní sled pokračuje biozónami *Monograptus rickartsonensis* a *Pristiograptus dubius* středního wenlocku. Typická jsou druhově velmi chudá společenstva graptolitů (2–3 druhy) s vysokou juvenilní mortalitou. Řada vrstevních ploch je pokryta sikulami a jen ojedinělými dospělými rhabdosomy. Střednímu wenlocku patří i následující biozóna *Monograptus belophorus* s hojným vůdčím druhem.

Svrchní část motolského souvrství byla na deponii zastoupena hlavně vápnitými břidlicemi mocné zóny *Cyrtograptus lundgreni*. V břidlicích se objevovaly kulovité či čokovité vápencové konkrce diagenetického původu. Profil motolským souvrstvím v radotínském tunelu se tak neliší od ostatních známých profilů břidličnou facií motolského souvrství.

Břidličný vývoj s roztroušenými vápencovými konkrkami pokračoval v radotínském tunelu i ve spodní části kopaninského souvrství. Převážně nepříznivé zachování graptolitových rhabdosomů však neumožnilo detailnější stratigrafický výzkum vyšších částí profilu.

## 5. Předběžné výsledky dosavadního výzkumu

Na bázi lavice křemenných pískovců ve svrchní části kosovského souvrství byla zjištěna poloha konglomerátu. Hojné valouny křemene, buližníku atp. svědčí o vysoké energii sedimentačního prostředí (podobně jako na profilu Hlásná Třebaň). V příslušné části pražské pánve dokládají maximální glacioeustatické změlní

sedimentačního prostoru v období vrcholícího zalednění Gondwany. Čerstvé vzorky hranice ordovik/silur (obr. 7) ukazují ostrý nástup černých břidlic bez zjevné diskordance. Obsah organického uhlíku (TOC) se zvyšuje skokově z 0,3 % na 2 %.

Graptolitové společenstvo s druhy rodu *Normalograptus*, které na bezprostřední bázi siluru předchází první objevení vůdčího druhu *Akidograptus ascensus*, lze korelovat s pre-ascensovou faunou z jz. Švédska (KOREN', AHLBERG a NIELSEN 2003). Formální bázi silurského útvaru tak posouvá několik centimetrů nad bázi černých břidlic.

Velmi pěkně je dokumentována litologická změna na stratigrafické diskordanci v nejnížší části silurského vrstevního sledu, pouhých 15 cm nad bázi černých břidlic, zvýrazněná také tenkou polohou plochých fosforitových konkrecí (obr. 8). Představuje úroveň maximální záplavy „maximum-flooding surface“ příslušné sekvence (ŠTORCH 2006). Na stratigrafické diskordanci v kondenzovaném vrstevním sledu chybí svrchní část graptolitové zóny *A. ascensus* a zóny *Par. acuminatus*, *Cyst. vesiculosus* a *C. cyphus*, které dohromady představují časový interval zhruba 4 milionů let podle současné časové škály (GRADSTEIN et al. 2004). Jemná jílovitá břidlice je vystřídaná slídnato-písčítým laminitem. TOC se zároveň zvyšuje z 2 % na hodnoty mezi 4 a 7 %. Definitivně byla vyloučena možnost, že by mohly graptolitové biozóny bazálního siluru na barrandienských profilech chybět jen v důsledku tektonického porušení vrstevního sledu.

V zónách „D“. *simulans* a *L. convolutus* byly zjištěny ojedinělé tenké polohy bioturbovaného sparitického vápence. Podobná poloha byla dosud nalezena jen v zóně *O. spiralis* v Malé Chuchli.

Poprvé byl přístupný úplný profil nezvětralými sedimenty biozóny *St. sedgwickii* (obr. 5). Bylo doloženo masové vymírání graptolitů na konci zóny *L. convolutus*, následované intervalem s minimem graptolitů a množstvím čockovitých poloh a konkrecí pyritu. Poloha vrstevnatého bioturbovaného slídnatého prachovce až pískovce je možným projevem relativního změlčení sedimentačního prostoru v důsledku nové (glacio?)eustatické regrese předpokládané LOYDELEM (1998).

Bazální jílovec lithlavského souvrství nasedá v tunelu na jílovité černé břidlice svrchní části zóny *St. sedgwickii*. Několik vložek černých břidlic, které se vyskytují ve vyšší části jílovce, obsahuje dobře zachovalou graptolitovou faunu zóny *R. linnaei* (obr. 11). Graptoliti následující zóny *S. turriculatus* (báze stupně telych) se vyskytují těsně nad světlým jílovcem, takže bazální jílovec lithlavského souvrství (viz KŘÍŽ 1975) reprezentuje větší část mocnosti zóny *R. linnaei*.

Stratigrafický sled byl postižen křehkými poruchami, které jej podle svého charakteru zdvojovaly nebo odstříhávaly. Lze předpokládat, že doložená stratigrafická opakování byla způsobena pohyby podél dvou větví v pokračování očkovského přesmyku, z nichž spodní byla zastížena štolou přímo (vrstevní nasunutí), svrchní pak modifikovaně po druhotném rozvlečení na s.-j. příčném zlomu. Třetí významnou poruchou je téměř směrný, poměrně strmý zlom poklesového charakteru způsobující tektonické odstřížení bazální části siluru u Lochkova.

## Literatura

- BOUČEK B. (1953): Biostratigrafie, vývoj a korelace želkovických a motolských vrstev českého siluru. – *Sborník Ústředního ústavu geologického, Oddíl paleontologický*, 20: 421–484.
- BRENCHEY P. J., ŠTORCH P. (1989): Environmental changes in the Hirnantian (upper Ordovician) of the Prague Basin, Czechoslovakia. – *Geological Journal*, 24: 165–181.

- ČERNÝ J. (2008): *Východní pokračování očkovského přesmyku*. – Bakalářská práce, Přírodovědecká fakulta Masarykovy university, Brno.
- GRADSTEIN F. M., OGG J. G., SMITH A. G. a kol. (2004): *A geologic Time Scale 2004*. – Cambridge University Press, 1–589. Cambridge.
- KOREN' T. N., AHLBERG P., NIELSEN A. T. (2003): The post-*persculptus* and pre-*ascensus* graptolite fauna in Scania, south-western Sweden: Ordovician or Silurian? – In: G. Ortega, G. F. Aceñolaza (Eds): *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Graptolite Conference and Field Meeting of the International Subcommission on Silurian Stratigraphy. INSUGEO, Serie Correlación Geológica* 18: 133–138. Tucumán.
- KŘÍŽ J. (1975): Revision of the Lower Silurian stratigraphy in central Bohemia. – *Věstník Ústředního ústavu geologického*, 50: 275–283.
- LOYDELL D. K. (1991): The biostratigraphy and formational relationships of the upper Aeronian and lower Telychian (Llandovery, Silurian) formations of western mid-Wales. – *Geological Journal*, 26: 209–244.
- LOYDELL D. K. (1998): Early Silurian sea-level changes. – *Geological Magazine*, 135: 447–471.
- LOYDELL D. K. (2007): Graptolites from the Upper Ordovician and Lower Silurian of Jordan. – *Special Papers in Palaeontology*, 78: 1–66.
- MELCHIN M. J., KOREN' T. N., ŠTORCH P. (1998): Global diversity and survivorship patterns of Silurian graptoloids. – In: E. Landing, M. E. Johnson (Eds): *Silurian Cycles: linkages of dynamic processes in the atmosphere and oceans. New York State Museum Bulletin*, 491: 165–182.
- ŠTORCH P. (1986): Ordovician-Silurian boundary in the Prague Basin (Barrandian area, Bohemia). – *Sborník geologických věd, Geologie*, 41: 69–103.
- ŠTORCH P. (1990): Upper Ordovician - lower Silurian sequences of the Bohemian Massif, central Europe. – *Geological Magazine*, 127: 225–239.
- ŠTORCH P. (1994): Graptolite biostratigraphy of the Lower Silurian (Llandovery and Wenlock) of Bohemia. – *Geological Journal*, 29: 137–165.
- ŠTORCH P. (1995): Biotic crises and post-crisis recoveries recorded by Silurian planktonic graptolite faunas of the Barrandian area (Czech Republic). – In: P. Čejchan, J. Hladil, P. Štorch (Eds): *Evolution and extinctions. Geolines*, 3: 59–70.
- ŠTORCH P. (1999): Graptolites of the *Pribylograptus leptotheca* and *Lituigraptus convolutus* biozones of Tmaň (Silurian, Czech Republic). – *Journal of the Czech Geological Society*, 43 (1998): 209–272.
- ŠTORCH P. (2001): Graptolites, stratigraphy and depositional setting of the middle Llandovery (Silurian) volcanic-carbonate facies at Hýskov (Barrandian area, Czech Republic). – *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 76: 55–76.
- ŠTORCH P. (2006): Facies development, depositional settings and sequence stratigraphy across the Ordovician-Silurian boundary: a new perspective from Barrandian area of the Czech Republic. – *Geological Journal*, 41: 163–192.