

Nová genetická definícia vrchnomiocénnych až kvartérnych litostratigrafických jednotiek Dunajskej panvy (západné Slovensko): nástroj efektívnej interpretácie v praktickej geológii

New genetic definition of the upper Miocene to Quaternary lithostratigraphic units of the Danube Basin (western Slovakia): A tool for effective interpretation in applied geology

MICHAL ŠUJAN

¹ Katedra geológie a paleontológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave; Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, Slovensko; miso@equis.sk

© Autori 2019. Vydal ŠGÚDŠ. Licencia Creative Commons BY 4.0. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstrakt. V posledných dvoch desaťročiach nastali významné zmeny v litostratigrafickej koncepcii sedimentov vrchného miocénu až kvartéru Dunajskej panvy. Nová koncepcia vychádza najmä z novej genetickej (sedimentologickej) definície súvrství a pomerne veľkého množstva nových údajov o ich veku. Na základe dokumentácie vrstevných sledov podľa odkryvov alebo profilov vrtvov je možná litostratigrafická definícia súvrstvia len s určitou štatistickou pravdepodobnosťou, pretože v Dunajskej panve bola opakovane pozorovaná značná premenlivosť facií každej diskutovanej litostratigrafickej jednotky. Mnohé faciie (napr. nivné íly alebo štrkové/piesčité výplne riečnych korýt) sa vyskytujú bežne v kvartérnych, pliocénnych aj vrchnomiocénnych sedimentoch Dunajskej panvy. Ich korektné zaradenie ku konkrétnej litostratigrafickej jednotke je možné len v prípade dostatočného množstva údajov (sled hrubý rádovo desiatky metrov, biostratigrafické a/alebo geochronologické údaje). Nové poznatky majú veľký význam pre geologickú prax, lebo sedimenty vrchného miocénu, pliocénu a kvartéru sú najčastejším objektom geologických úloh hydrogeologického, inžinierskegeologického alebo ložiskového geologického prieskumu. Keďže prevažná časť geologických úloh využíva interpolácie rozhraní medzi prieskumnými dielami, korektné litostratigrafické zaradenie skúmaného sedimentárneho sledu môže významne prispieť k zníženiu interpretačných neurčitostí. Typickým príkladom je správna interpretácia laterálneho pokračovania hydrogeologického kolektora/izolátora, stanovenie úrovne a smerovej continuity nepriepustného podložia pri zakladaní náročných stavieb pod hladinou podzemnej vody alebo na účely prieskumu environmentálnych záťaží (napr. skládky odpadu).

KLúčové slová: Dunajská panva, litostratigrafia, vrchný miocén, pliocén, kvartér, analýza facií

Abstract. The lithostratigraphic conceptions of the upper Miocene to Quaternary sedimentary fill of the Danube-Kisalföld Basin experienced significant modification since the beginning of the 21st century, based on new genetic (sedimentological) definition and new biostratigraphic and geochronological data. A sedimentary succession observed on an outcrop or in a well-core is representative for a lithostratigraphic unit only with a specific probability, since a significant facies variability of all formations mentioned below was observed across the Danube Basin. Many facies, e.g. floodplain muds and sandy or gravelly channel fills, are present commonly in sediments of the Quaternary, Pliocene and late Miocene age, and hence could be associated with a specific lithostratigraphic unit only based on sufficient amount of data (succession tens of meters thick, biostratigraphic and/or geochronological

data). New knowledge is relevant also for the applied geosciences, since the upper Miocene, Pliocene and Quaternary strata are the most common subjects of hydrogeological, engineering-geological and exploration geology surveys. Correct lithostratigraphic ranking of a studied sedimentary succession could significantly decrease the inaccuracy in interpretations, because most of the applied geological tasks is based on interpolation of geological boundaries between well-cores or probes. A typical example is correct interpretation of lateral continuity of hydrogeological collector or aquiclude, determination of elevation and lateral continuity of impermeable subsoil related to foundation of buildings below the groundwater level, or permeability of basement associated with environmental damage survey, e.g. landfills.

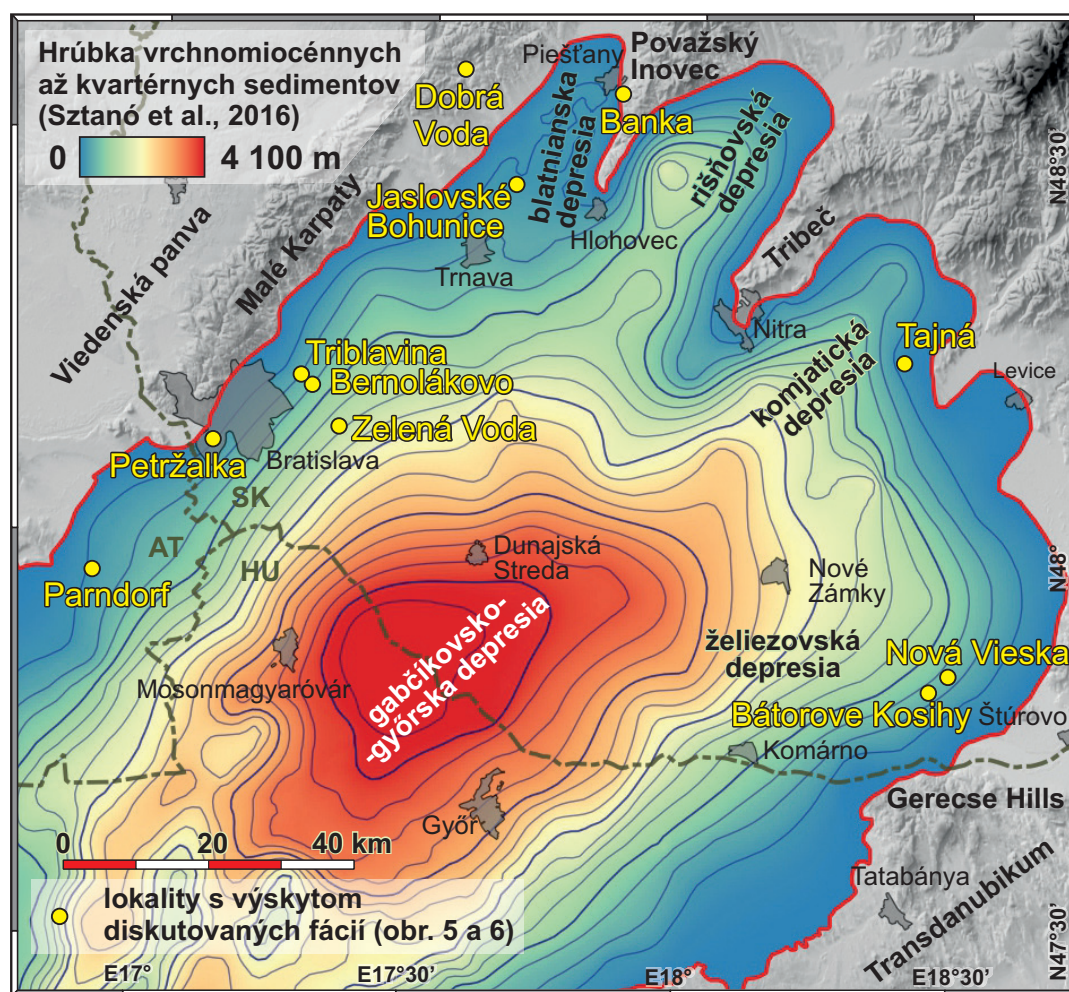
Key words: Danube-Kisalföld Basin, lithostratigraphy, upper Miocene, Pliocene, Quaternary, facies analysis

Úvod

Príspevok sumarizuje najnovšie poznatky o veku a charaktere vrchnomiocénnej až kvartérnej sedimentárnej výplne Dunajskej panvy (obr. 1). Má za cieľ pomôcť čitateľovi zorientovať sa v problematike a poukázať na možné dôsledky a prínosy novej definície litostratigrafických jednotiek z hľadiska aplikovaného výskumu, ako aj z hľadiska geologického mapovania. Prezентuje súbor znakov, ktoré je možné použiť na rozlíšenie jednotlivých súvrství. Súčasťou textu sú názorné príklady facií, ktoré sú hlavnou náplňou viacerých litostratigrafických jednotiek. Cieľom je poukázať na nedostatočnosť určovania litostratigrafickej príslušnosti len na základe vizuálneho zhodnotenia litotypov, keďže zhodne vyzerajúce faciie sa vyskytujú vo viacerých súvrstviach.

Vývoj koncepcie definície súvrství vrchného miocénu až kvartéru Dunajskej panvy

Definícia litostratigrafických jednotiek Dunajskej panvy na Slovensku pôvodne vychádzala z korelácie regionálnych stupňov centrálnej Paratetýdy ako panón, pont, dák a ruman (napr. Steininger et al., 1985). Pôvodná definícia predpokladala, že náplň každého z uvedených štyroch stupňov reprezentujú samostatné sekvencie v zmysle dnešnej



Obr. 1. Hrúbka sedimentov vrchného miocénu, pliocénu a kvartéru Dunajskej panvy podľa Sztanó et al. (2016) s lokalizáciou diskutovaných lokalít.

Fig. 1. Thickness of the upper Miocene to Quaternary sedimentary succession of the Danube Basin *sensu* Sztanó et al. (2016) with location of the localities discussed in the paper.

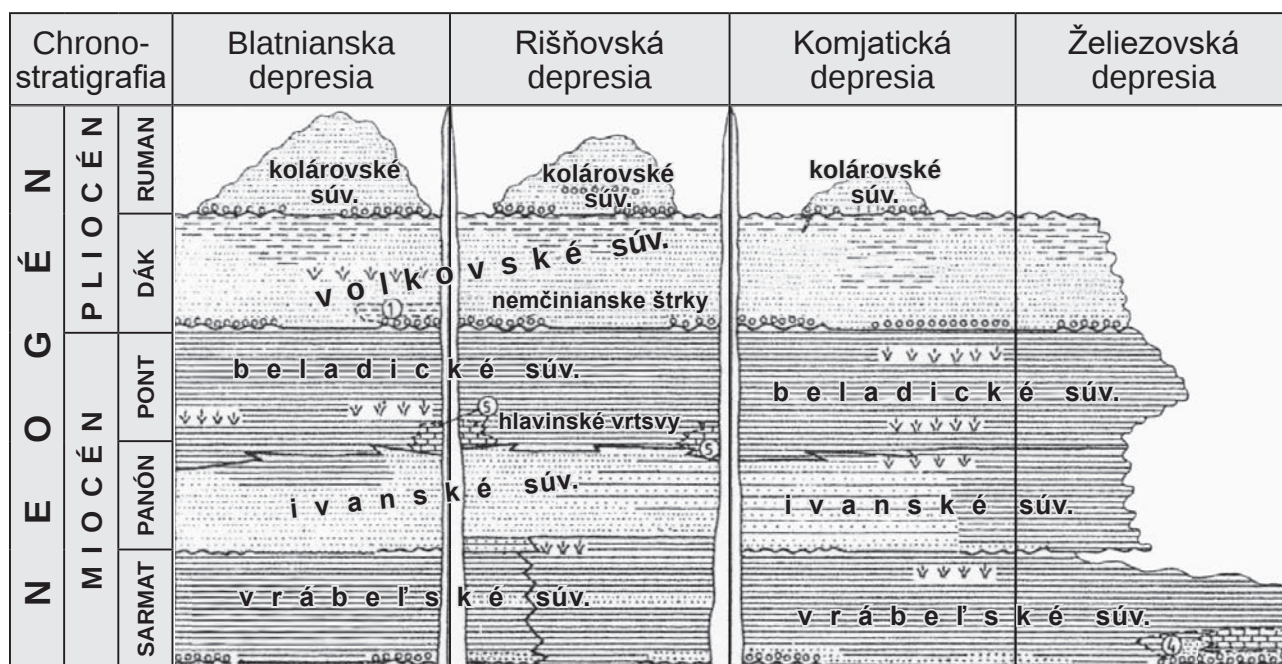
definície sekvenčnej stratigrafie (Catuneanu, 2017), teda sedimentárne sukcesie pozostávajúce zo sedimentov cyklu od transgresie po regresiu (napr. Buday et al., 1967; Adam a Dlabáč, 1969; Biela, 1978). Autorov k tomu viedol fakt, že v sedimentoch zaradených do panónu prevláda fauna mäkkýšov a ostrakód brakickej (mezohalinnej) salinity, pričom nadložné sedimenty zaradené do pontu obsahovali faunu typickú pre zníženu (oligohalinnú) salinitu a pre vrstvy zaradené do dáku už bola charakteristická len sladkovodná fauna. Podstatným nedostatkom tohto prístupu je fakt, že stupne pont, dáku a ruman sú definované na základe špecifickej marinnej alebo brakickej fauny, ktorá sa vyskytuje len vo východnej Paratetýde (napr. Dácka panva, Čierne more) (Steininger et al., 1985; Jipa et al., 2007; Stoica et al., 2007, 2013). Uvedené stupne teda nie je možné doložiť a korelovať pomocou biostratigrafie v oblasti Dunajskej panvy.

V 80. rokoch 20. storočia v súlade s medzinárodnými štandardmi bol zavedený systém súvrství, no táto zmena sa nepremietla aj do koncepcie ich definície. Boli len premenované jednotky s rovnakou náplňou, teda sedimenty panónskeho veku boli zaradené do ivanského súvrstvia, sedimenty pontského veku do beladického súvrstvia a sedimenty dáckeho veku do volkovského súvrstvia (obr. 2) (napr. Priehodská a Harčár, 1988; Vass et al., 1990; Vass, 2002). V tejto koncepcii ostali pozostatky z predchádzajúcej terminológie ako uhoľná, pestrá či modrá séria, ktoré

vzišli z praxe korelácie sedimentov pri uhl'ovodíkovom prieskume Viedenskej panvy (Janoschek, 1943). Bol zavedený aj termín kolárovske súvrstvie pre sedimenty neskoropliocénneho veku prislúchajúce k stupňu ruman, ktorý vychádzal z predtým definovaných kolárovských vrstiev, respektíve k stupňu levant bez korektnej definície pre oblasť Dunajskej panvy (Janáček, 1969, 1971).

Podľa pôvodnej koncepcie každá litostratigrafická jednotka *ex definitione* obsahovala viaceré depozičné systémy (napr. depozičný systém otvorenej panvy, delty a aluviálnej roviny), čím vznikali problémy pri jej praktickej aplikácii. Rôznosť depozičných systémov determinovala výskyt širokého spektra litotypov, ktorých korektné rozlíšenie pri mapovaní alebo pri interpretácii vrstiev bez dostatku paleontologických nálezov alebo geochronologických údajov nebolo možné. Z toho vyplýva podstatný problém správnej korelácie súvrství pri konštrukcii rezov v mierke panvy alebo jej časti. Rovnaký problém ale sprevádza aj korelácie vo veľkých mierkach praktických aplikácií, napr. v prípade staveniska.

Budúci vývoj prístupu k definícii litostratigrafických jednotiek vrchného miocénu predznamenala spolupráca na významných medzinárodných projektoch. Projekt DAN-REG bol zameraný na tvorbu cezhraničných stratigrafických schém, máp hrúbky jednotlivých litostratigrafických členov a máp vývoja facií na účely aplikovaného výskumu v Dunajskej panve (Nagy et al., 1998a, b, 2000). Aj keď



Obr. 2. Príklad originálnej litostratigrafie Dunajskej panvy podľa Vassa (2002).

Fig. 2. An example of lithostratigraphic subdivision of the Danube Basin based on Vass (2002).

v rámci projektu s ohľadom na genetické vzťahy jednotlivých súvrství litostratigrafia nebola revidovaná, boli korelované seizmické rezy a litologický charakter súvrství naprieč štátnymi hranicami. To bol dôležitý krok v ďalšom výskume panvy. Na potrebu genetického prístupu založeného na charaktere facií v rámci súvrství panónskeho veku upozornili Fordinál et al. (2001). Autori konštatujú, že v dôsledku zmien salinity je využitie biostratigrafie problematické. Uvedené zmeny salinity boli dokumentované napríklad v prácach Fordinála a Tubu (1992), Nagya et al. (1995) alebo Barátha et al. (1999). K budúcemu vývoju litostratigrafických definícií súvrství Dunajskej panvy významnou mierou prispel projekt TRANSENERGY. Zahŕňal cezhraničné porovnávanie seizmických rezov a litologického charakteru vrchnomiocénnych, pliocénnych a kvartérnych sedimentov (Maros et al., 2012).

Pôvodná koncepcia počas následného obdobia výskumu od začiatku 21. storočia čelila novým geochronologickým údajom. Boli postavené najmä na biostratigrafii cicavcov a dinocýst, magnetostratigrafii a numerickom datovaní pomocou kozmogénnych nuklidov. Poukázali na fakt, že ivanské, beladické aj volkovské súvrstvie svojou podstatnou časťou zasahujú do vekového intervalu panónu (ca 11,6 – 5,8 mil. r.; Kováč, 2000; Kováč et al., 2006, 2010, 2011; Šujan et al., 2016a). Zároveň boli zohľadnené zistenia o architektúre súvrstiev sedimentov výplne panónskeho panvového systému (hlavne v Maďarsku), ktorého je Dunajská panva súčasťou. Na základe štúdia rozsiahleho súboru údajov z odkryvov, vrtov a seizmických rezov sa zistilo, že celá sukcesia výplne panvy panónskeho veku predstavuje jednu sústavu depozičných systémov, postupne vyplňajúcich jeden systém paniev Panónskeho jazera (Juhász, 1994; Magyar et al., 1999, 2000, 2007; Juhász et al., 2007; Magyar et al., 2013; Sztanó et al., 2013a, b). Zmeny v salinite vo vertikálnom slede vrstiev existujú len preto,

lebo pôvodne brakická panva je po progradácii svahu šelfu v dôsledku prínosu sedimentu nahradená deltovým depozičným systémom. Ten zahŕňa aj deltovú rovinu s lagunárnym prostredím, kde dochádzalo k postupnému znižovaniu salinity vo vodnom stĺpci. Ako ekvivalent môže poslužiť holocénne a dnešné prostredie delty Dunaja alebo Pádu, kde na území s rozsahom desiatok kilometrov dochádzalo k záplavám a následnej progradácii systému v časovej škále tisícov rokov (Vespremeanu-Stroe et al., 2017; Amorosi et al., 2019a, b). Deltové prostredie je následne v dôsledku progradácie nahrádzané aluviálnym prívodným systémom riečnych kanálov a okolitej nivy. Použitie biostratigrafie v pôvodnej koncepcii súvrství bolo preto spojené s viacerými problémami, keďže v depozičnom systéme uvedeného typu sa vo vertikálnom slede nevyhnutne musia opakovať rytmické zmeny v salinite prostredia s hrúbkou prvých metrov až desiatok metrov paralelne s postupným striedaním parasekvencií (napr. Sztanó et al., 2013b).

Zásadnou zmenou vyplývajúcou z uvedeného genetického pohľadu na sedimentárnu sukcesiu je predpoklad súvekej existencie všetkých uvedených facií s odlišnou salinitou: aluviálny prívodný systém dotuje sedimentom deltu, ktorá prograduje do panvového prostredia. Vrstevné sledy reprezentujúce jednotlivé časti sukcesie museli byť aspoň čiastočne uložené v rovnakom čase. Ďalším dôsledkom genetickej sedimentologickej koncepcie je diachrónia hraníc litostratigrafických jednotiek v dôsledku progradácie depozičných systémov v čase, t. j. zmena súvrstvia z jedného na druhé nastáva v rôznych častiach časti panvy v odlišnom čase.

Úplná regresia Panónskeho jazera (zmena z deltového beladického súvrstvia na aluviálne volkovské súvrstvie) preto nastala v oblasti Bratislavy pred 10 mil. rokov, zatiaľ čo v oblasti južne od Nových Zámkov až v období pred

8,9 – 8,7 mil. rokov. Uvedená diachronia hraníc súvrství bola spôsobená existenciou hlbokovodného prostredia, dosahujúceho hĺbku vodného stĺpca v centre panvy až 300 – 500 m. Takéto prostredie sa postupne vyplňalo progradáciou svahu šelfu, čo v prípade Dunajskej panvy trvalo vyše milióna rokov (Sztanó et al., 2016). Panónske jazero sa preto vyplňalo postupne počas približne siedmich miliónov rokov a zaniklo až v skorom pliocéne v oblasti Srbska, zhruba 450 km na juhovýchod od Dunajskej panvy (Magyar et al., 2013).

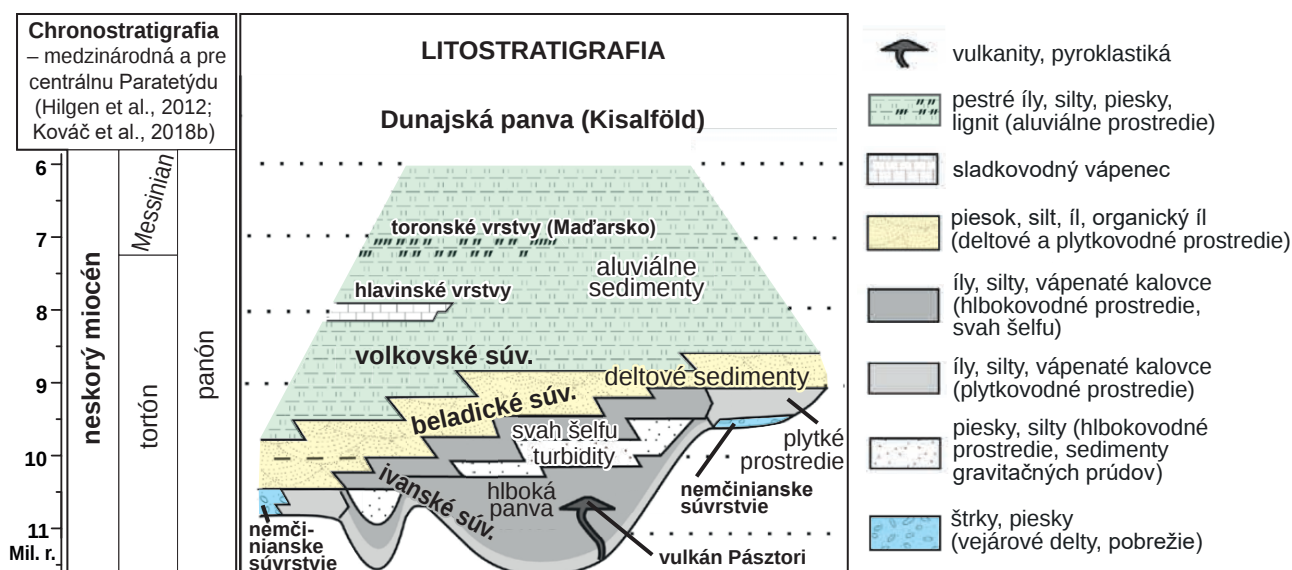
Ďalším prínosom genetického prístupu k štúdiu týchto súvrství bolo zavedenie interpretácie nívnych facií vo volkovskom a beladickom súvrství. Ílovité a siltovité sedimenty s obsahom sladkovodnej fauny alebo bez zachovaných fosílnych pozostatkov boli totiž často interpretované ako uloženiny jazerného prostredia (napr. Jiříček, 1974; Vass et al., 1990). V prípade obsahu piesčitých vrstiev so šikmým zvrstvením alebo štrkov indikujúcich transport trakčným prúdením sa často používal termín „fluviolakustrinné“ prostredie. Termín je však zo sedimentologického hľadiska pomerne vágny a jeho používanie nemá genetický, a teda ani praktický význam. Po zohľadnení existujúcich sedimentologických poznatkov bolo možné konštatovať, že spomínané jemnozrnné faciie boli uložené v terestrickom prostredí riečnej nivy (napr. Aslan a Autin; 1999; Campo et al., 2016; Šujan et al., 2016a, 2020). Celkovo boli pozorované dva typy nívnych facií: 1. dobre odvodňovaná riečna niva s nízkou hladinou podzemnej vody, kde prebiehajú intenzívne pedogénne procesy v oxidačnom prostredí, vrstvy sú preto pestrých a hrdzavých farieb, s vápenatými konkréciami a pedogénnymi horizontmi, bez fosílnych pozostatkov, 2. zle odvodňovaná riečna niva s vysokou hladinou podzemnej vody, kde sa vyskytujú jemnozrnné vrstvy sivých a modrých odtieňov so zachovanými fosílnymi pozostatkami flóry a fauny, bez znakov oxidácie a pedogenézy. Nie je prekvapením, že hlavne vo volkovskom súvrství tvoria nívne sedimenty často až 80 % stratigrafického stĺpca v pomere k piesčitém faciám, keďže v centrálnej časti panvy sedimentácia dosahovala rýchlosť až 450 m za mil. rokov. Aj

na okrajoch panvy prebiehala akumulácia nezanedbateľnou rýchlosťou, okolo 200 m za mil. rokov (Šujan et al., 2016a, 2017, 2020; Joniak et al., 2020).

Argumenty za zavedenie tejto koncepcie aj v Dunajskej panve, okrem už spomínaných geochronologických údajov, vzišli predovšetkým zo seizmickej stratigrafie. Pri nej sa zistilo, že sedimenty pokladané za ivanské, beladické a volkovské súvrstvie sa nachádzajú na jednom seizmickom horizonte (reflexe) a sú teda súveké (Kováč et al., 2010, 2011). Zavedenie genetickej litostratigrafickej koncepcie na základe dokumentovanej architektúry výplne panvy viedlo k novej definícii súvrství vrchného miocénu v prácach Sztanó et al. (2016) a Šujana et al. (2016a) (obr. 3):

- ivanské súvrstvie – obsahuje faciie depozičných systémov dna panvy, turbiditov, svahu šelfu a plytkého otvoreného jazerného prostredia uložené len v brakickom prostredí;
- beladické súvrstvie – obsahuje prechodné faciie uložené v prostrediach delty, pobrežia a deltovej roviny, vyskytujú sa tu preto vrstvy a fauna od brakickej salinity po sladkovodné prostredie; keďže deltové parasekvencie sa pri opätovných záplavách ukladajú nad sebou, variácie v salinite sa cyklicky opakujú vo vertikálnom slede;
- volkovské súvrstvie – aluviálne faciie bez výkyvov v salinite (absencia brakickej fauny), v Dunajskej panve prevažne s dominanciou nívnych facií nad výplňami riečnych kanálov.

Na základe následného štúdia bolo možné rozpoznať aj význam starších termínov litostratigrafie. Uhoľná séria je časťou beladického súvrstvia, ktoré bolo uložené na deltovej rovine, a preto obsahuje značné množstvo vrstiev lignitu (Sztanó et al., 2016; Šujan et al., 2016a, 2020). Modrá séria v jej nadloží je spodnou časťou volkovského súvrstvia, pričom prevaha modrých ílov je výsledkom slabo odvodňovanej riečnej nivy s vysokou hladinou podzemnej vody, kde nedochádzalo k oxidačným procesom a pedogenéze.

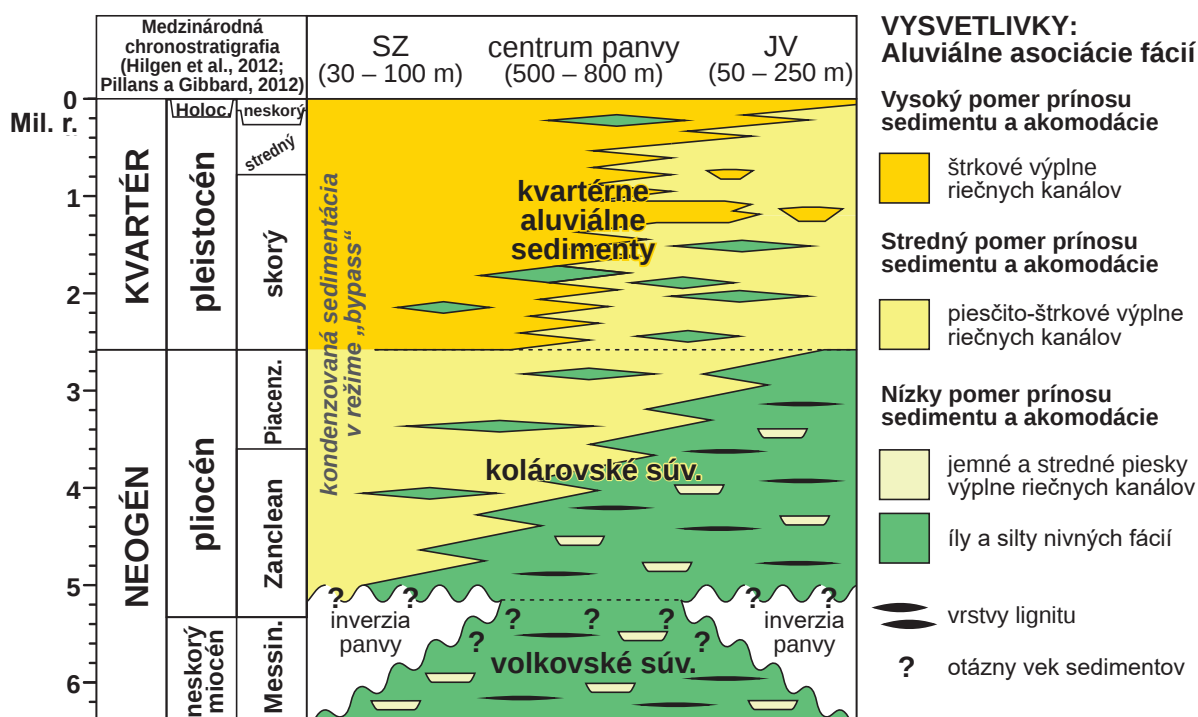


Obr. 3. Litostratigrafia Dunajskej panvy v období neskorého miocénu (upravené podľa Sztanó et al., 2016).

Fig. 3. Lithostratigraphy of the Danube-Kisalföld Basin upper Miocene sequence (Sztanó et al., 2016, modified).

Podobné prostredie je charakteristické pre aluviálne roviny priľahlé k deltovej rovine s veľmi miernou topografiou (Syvitski et al., 2012; Lewin a Ashworth, 2014). Následne pri progradácii depozičného systému sa zvýšil prínos sedimentu a zväčšil sa gradient toku, ktorý má za následok laterálnu migráciu – meandrovanie (Timár, 2001; Zámolyi et al., 2010). Migrácia koryta spôsobuje topografickú diferenciáciu vedúcu k lepšiemu odvodňovaniu nivy, nižšej hladine podzemnej vody a oxidačným a pedogenetickým procesom (Joniak et al., 2020; Šujan et al., 2020). Preto sa v nadloží modrej série nachádza takzvaná pestrá séria, taktiež súčasť terestrického volkovského súvrstvia, no obsahujúca pestro sfarbené íly a silty s vápenatými konkréciami a pôdnymi horizontmi. Dominancia oxidačného prostredia spôsobila obvyklú absenciu fosílií v uvedenej časti volkovského súvrstvia.

prínos sedimentu, čo viedlo k postupnej dominancii facií riečnych kanálov v celej oblasti centrálného depocentra (obr. 4). Na hranici pliocénu a kvartéru (ca 2,6 mil. r.) došlo k náhlemu nárastu prínosu sedimentu, pravdepodobne spojenému s klimatickými zmenami, a ku kontinuálnej sedimentácii aluviálneho charakteru s prevahou štrkových korytových facií (Šujan et al., 2018). Oblasti mimo gabčíkovskej depresie, napríklad blatnianska depresia (Trnavská pahorkatina) a komjatická depresia (Hronská pahorkatina), boli v období ~5 – 3 mil. rokov erodované a peneplenizované. V období ~3 – 1 mil. rokov prebiehala výrazne kondenzovaná sedimentácia a tvorba ojedinelých riečnych terás a približne od ~1 mil. rokov do súčasnosti vznikali rozsiahle systémy riečnych terás súbežne s postupným vyzdvíhnutím okrajových hrastí pohorí (napr. Šujan a Rybár, 2014; Šujan et al., 2016; Ruszkiczay-Rüdiger et al., 2016, 2018).



Obr. 4. Litostratigrafia Dunajskej panvy v období pliocén – kvartér (upravené podľa Šujana et al., 2018).

Fig. 4. Litostratigraphy of the Danube-Kisalföld Basin Pliocene to Quaternary (Šujan et al., 2018, modified).

Kolárovske súvrstvie sa ukladalo po inverzii panvy, ktorá prebehla v čase medzi 6 – 5 mil. rokov (Šujan et al., 2018). Táto kompresná udalosť viedla k prerušeniu sedimentácie volkovského súvrstvia a vytvoreniu vrás litosférických rozmerov, v prípade Dunajskej panvy so synklinálou (pokles) v oblasti gabčíkovskej depresie a s antiklinálami (výzdvih) v oblastiach Malých Karpát a Transdanubika (Horváth, 1995; Horváth et al., 2006; Šujan et al., 2018). Uvedené megavrasy sa nazývajú sávske vrasy a možno ich pozorovať až po oblasť severného Slovinska a Chorvátska (napr. Placer, 1999). Na okrajoch panvy prevládala erózia, zatiaľ čo v centre prebiehala aluviálna sedimentácia kolárovskeho súvrstvia. Tento fakt sa prejavil uhlovým kontaktom kolárovskeho a volkovského súvrstvia, viditeľným na seizmických rezoch, keďže miocénne sukcesie boli inverziou naklonené (Šujan et al., 2018). Pre kontinuálnu sedimentáciu v gabčíkovskej depresii bol charakteristický rastúci

Kvartérne sedimenty v aktuálnom litostratigrafickom členení nie sú zahrnuté do definovaných litostratigrafických jednotiek. V zmysle argumentácie podľa Šujana (2015) nie je vhodné používanie alpínskej morfostratigrafickej stupnice (napr. mindel, riss, würm) len na základe morfolologickej pozície, pokiaľ neexistujú geochronologické údaje dokazujúce vek akumulácie. V prípade existencie geochronologických údajov bola akumulácia riečnych terás často potvrdená ako relatívne náhly jav kompenzujúci nestabilitu v depozičnom systéme. Akumulácia terás prebieha spravidla podstatne kratšie ako trvanie glaciálov, teda tisíce rokov namiesto viacerých desiatok tisíc rokov (napr. Vandenbergh, 2008).

Na základe uvedených faktov o vrchnomiocénnom až kvartérnom vývoji Dunajskej panvy možno konštatovať existenciu dvoch superponovaných sedimentárnych sekvencií, v zmysle Catuneanu (2017) oddelených diskordanciou:

1. vrchnomiocénna sekvencia spojená s transgresiou a regresiou Panónskeho jazera, 2. pliocénno-kvartérna sekvencia uložená po tektonickej inverzii panvy.

Identifikácia súvrství a praktický význam ich novej definície

Uvedená nová definícia litostratigrafie Dunajskej panvy umožňuje pomerne priamočiary prístup k identifikácii súvrství: 1. ak sa v sukcesii vyskytujú len brakické panvové fácie, ide o ivanské súvrstvie, 2. ak sa v hodnotenej sukcesii vyskytujú sedimenty s panvovými aj terestrickými fáciami a brakickou aj sladkovodnou faunou, ide o prechodné beladické súvrstvie, 3. pri absencii brakickej fauny a fácií spojených s brakickou salinitou a naopak, s výskytom len fácií aluviálnej roviny, možno sedimenty pokladať za volkovské súvrstvie.

Určitou nevýhodou prístupu je nevyhnutnosť štúdia štatisticky významného množstva údajov. Potrebné je hodnotenie dostatočne hrubej sukcesie, ktorá môže obsahovať záznam variácie salinity a prostredia spojenej so striedaním parasekvencií a autogénnych zmien depozičných systémov (laterálna migrácia deltových lalokov a prívodných kanálov, avulzia), t. j. aspoň prvé desiatky metrov vrstevného sledu. Z toho vyplýva, že litostratigrafická príslušnosť vrstiev určená na základe niekoľkých metrov pozorovaného sedimentárneho záznamu je nedostatočná, pokiaľ k týmto sedimentom neexistujú biostratigrafické alebo geochronologické údaje. Konštatovanie je platné najmä pri rozlišovaní beladického a volkovského súvrstvia, ktoré čiastočne obsahujú vrstvy uložené rovnakými depozičnými procesmi, t. j. niektoré ich úseky môžu byť vizuálne (makroskopicky) zhodné.

Identifikácia asociácií fácií riečnej nivy a riečnych kanálov, ako aj ich pomerného zastúpenia vo volkovskom súvrství má významný dosah na hydrogeologickú prospekciu, keďže toto súvrstvie tvorí podložie kvartérnych sedimentov na prevažnej väčšine plochy Podunajskej nížiny (mimo gabčíkovej depresie). Piesčité riečne kanály tvoria napríklad v oblasti Bernolákova len zhruba 20 – 30 % zo stratigrafického sledu a je len malá pravdepodobnosť ich spojitosti v dôsledku izolácie v prevažne ílovitých nívnych sedimentoch (Joniak et al., 2020). Rovnaké telesá piesčitých riečnych kanálov tvoria 30 – 50 % súvrstvia v oblasti južnej Hronskej pahorkatiny, 0 – 20 % v jej severnej časti (Šujan et al., 2020) a 20 – 40 % v severnej časti Nitrianskej pahorkatiny (Šujan et al., 2017). Identifikácia distribučného fluvialneho systému v blatnianskej depresii medzi Piešťanmi a Hlohovcom, pozostávajúceho prevažne zo štrkových výplní riečnych kanálov, môže byť významným faktorom priestorovej distribúcie hydrogeologických kolktorov (Šujan et al., 2017).

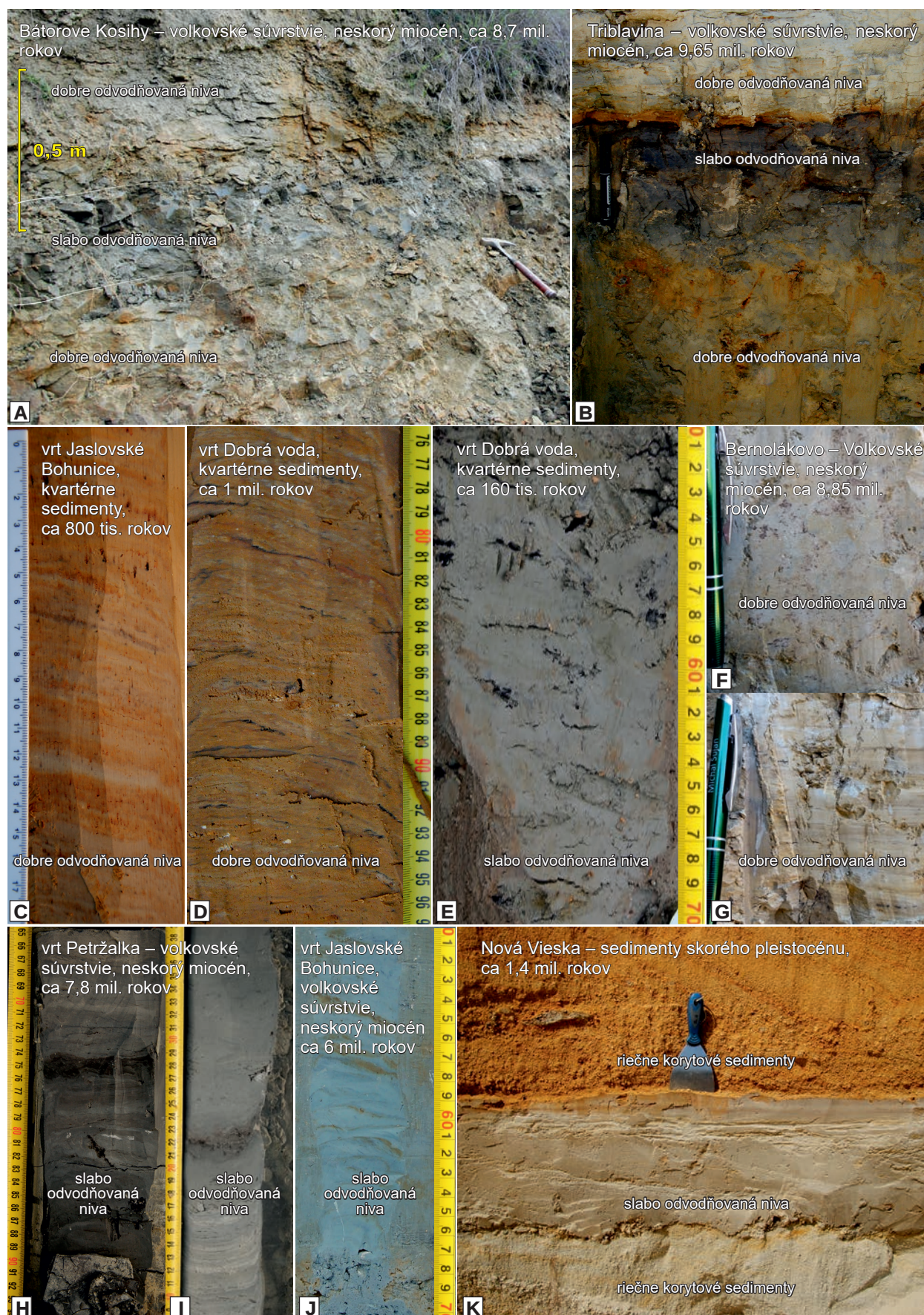
Definícia kolárovskeho súvrstvia je značne problematická. Nachádza sa len vo výplni panvy zakryté kvartérnymi sedimentmi, nie sú známe jeho odkryvy a obsahuje len terestrické fácie. Jeho sedimentologická náplň sa preto študovala len vo vrtoch. Pri porovnaní geometrie súvrstvia v seizmických rezoch a litologického zloženia vo vrtných profiloch sa zistilo, že značná časť súvrstvia pozostáva

z nívnych ílovitých fácií, ktoré sú postupne nahrádzané korytovými piesčitými a štrkopieskovými fáciami v dôsledku nárastu prínosu sedimentu v období 5,0 – 2,6 mil. rokov. Bolo uložené v aluviálnom prostredí, rovnako ako podložné volkovské súvrstvie aj nadložné kvartérne sedimenty. Ich rozlíšenie bez poznania pozície skúmaných sedimentov v rámci geometrie výplne panvy môže byť preto neisté (Šujan et al., 2018).

Z princípu aktualizmu (Lyell, 1872) vyplýva možnosť identického vzhľadu ílovitých fácií holocénneho, pleistocénneho aj miocénneho veku. Na charakter fácií v zmysle diagenézy (resp. litifikácie) má dominantný vplyv hĺbka pochovania a nie vek (Athy, 1930). Uvedenú skutočnosť je možné ilustrovať súborom príkladov nívnych fácií z odkryvov aj vrtoch (obr. 5). Fácie na obr. 5A, B, F – J predstavujú dobre aj slabo odvodňovanú riečnu nivu volkovského súvrstvia, zatiaľ čo na obr. 5C – E a 5K sú zástupcami toho istého typu fácií kvartérneho veku. Ako možno vidieť, variabilita nívnych fácií je značná a každý ich typ sa môže vyskytovať v ľubovoľnej litostratigrafickej jednotke riečného pôvodu. Kvartérne sedimenty, volkovské a kolárovske súvrstvie sa od seba líšia len štatistickou pravdepodobnosťou výskytu nívnych fácií.

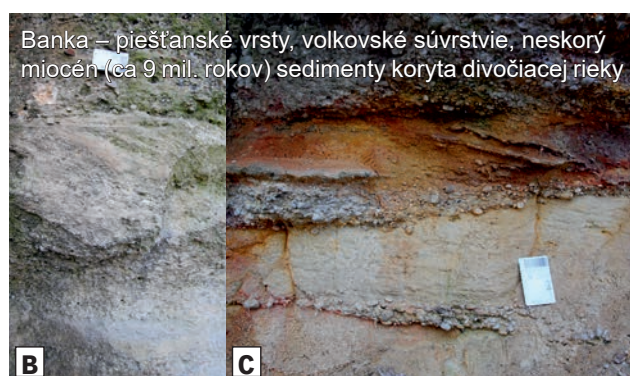
Rovnako prítomnosť fácií deponovaných trakčným transportom pozostávajúcich zo štrkov a pieskov nie je diagnostickým faktorom špecifických litostratigrafických jednotiek. Pre sedimenty uložené vo vodnom jednosmernom prúde v koryte, či už je to rieka, alebo delta, je charakteristické ukladanie v podobe dún a barov, ktoré pozostávajú zo šikmých zvrstvení a čerín (Miall, 2006). Uvedený typ sedimentov tvorených štrkami a pieskami je možné nájsť vo vrchnomiocénnych sedimentoch volkovského súvrstvia a nemčinianskych štrkoch (obr. 6A – C), ako aj v sedimentoch kolárovskeho súvrstvia a kvartérnych uloženinách (obr. 6D, E). Materiál získaný štandardným vrtným prieskumom (napríklad na inžinierskogeologické alebo hydrogeologické účely) spravidla nepostačuje na korektné litostratigrafické zaradenie hrubozrnných fácií bez korelácie s podrobnými štúdiami v danej oblasti. Detailné štúdie by mali byť založené na dostatočnom množstve údajov podložených biostratografiou a geochronológiou.

Aj keď najvrchnejšia časť výplne panvy kvartérneho veku obsahuje prevažne hrubozrnné fácie výplne riečnych koryt, koreláciou vrtných profilov a reflexnej seizmiky sa preukázalo, že hlavne v juhovýchodnej časti gabčíkovej depresie (od Dunajskej Stredy po Komárno) a v sedimentoch staršieho pleistocénu sú pomerne bežne zachované aj vrstvy nívnych ílovitých fácií (Šujan et al., 2018). Uvedené vrstvy sa zriedkavejšie vyskytujú aj v stredno- a vrchnopleistocénnej časti sukcesie. Pozorovanie má významný vplyv na štandardne používaný prístup pri vrtnom prieskume, pri ktorom sa prvá vrstva ílov/siltov navrátna pod štrkopieskami pokladá (často nesprávne) za neogénne sedimenty (resp. podložie kvartérnych sedimentov). V podobnom prípade môže byť overený povrch nívnej fácie kvartérneho veku, pod ktorou sa môžu nachádzať ďalšie štrkopiesky (obr. 7E). Ak je napríklad účelom prieskumu identifikácia hĺbky/povrchu nepriepustného podložja, je potrebné spoľahlivé overenie pokračovania sledu aspoň



Obr. 5. Príklady vrchnomiocénnych a kvartérnych výskytov nívnych facií na odkryvoch a vo vrtoch (Joniak et al., 2020; Šujan et al., 2019, 2020 a archív autora).

Fig. 5. Examples of upper Miocene and Quaternary floodplain facies observed on outcrops and in well-cores (Joniak et al., 2020; Šujan et al., 2019, 2020 and archive of the author).



Obr. 6. Príklady vrchnomiocénnych a kvartérnych výskytov facií štrkopieskových sedimentov výplne riečného alebo deltového koryta na odkryvoch (Šujan et al., 2017, 2018 a archív autora).

Fig. 6. Examples of upper Miocene and Quaternary sandy-gravelly channel-fill facies from a delta plain or an alluvial plain observed on outcrops and in well-cores (Šujan et al., 2017, 2018 and archive of the author).

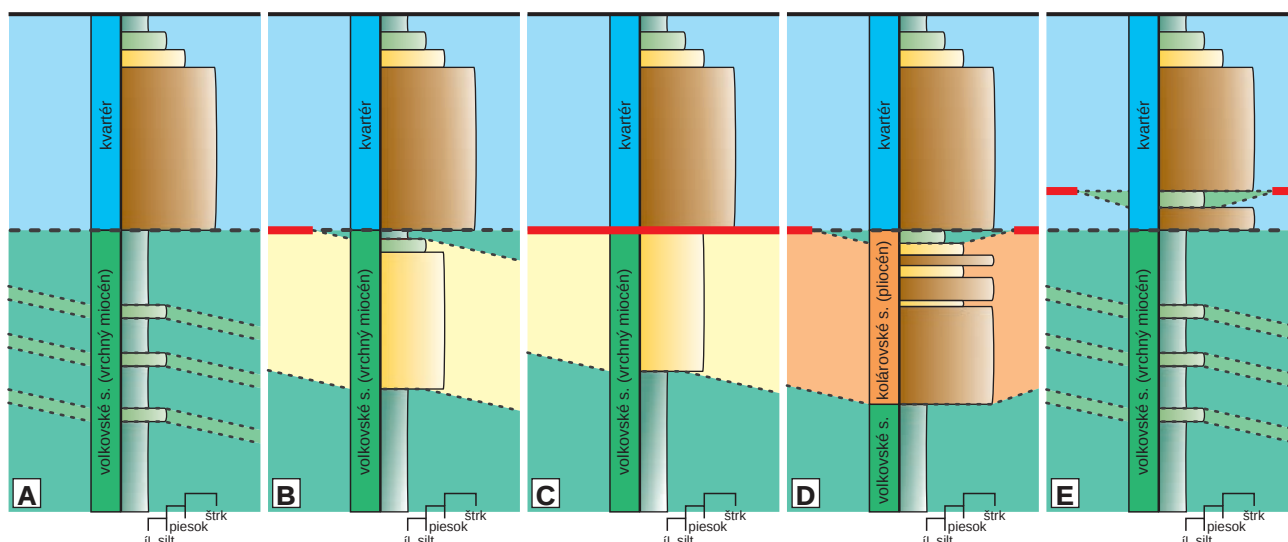
o niekoľko metrov hlbšie. V oblasti Bratislavy boli pod sedimentmi kvartérneho veku opísané lokálne výskyt kolárovskeho súvrstvia, vyplňajúce erózne depresie na povrchu vrchnomiocénnych sedimentov (Šujan et al., 2016b). Tieto sedimenty pozostávajú rovnako z pieskov a menej štrkov, pričom od nadložných štrkopieskov môžu byť oddelené ílovitými vrstvami len čiastočne (obr. 7D). Podobná situácia nie je zriedkavá a predstavuje významnú komplikáciu pri návrhoch hydraulického ochrany hlbokých stavebných jám, ale najmä pri hodnotení vplyvu environmentálnych záťaží na podzemnú vodu (napr. tzv. vrakunská skládka). Samostatným problémom je nesprávne stratigrafické zaradenie sedimentov overených vrtmi v aplikovaných geologických dokumentáciách, ktoré sa často ďalej prenáša do novších prác ako vstupný parameter.

Na obrázku 7 sú znázornené sledy kvartérnych fluvialných sedimentov a ich podložia, bežné v oblasti Bratislavy. Aj keď štatisticky najpravdepodobnejší je výskyt ílovitého volkovského súvrstvia pod kvartérnymi štrkopieskami (obr. 7A), pod kvartérnymi štrkopieskami sa bežne vyskytujú aj čiastočne izolované alebo hydrogeologicky úplne prepojené piesky riečnych kanálov volkovského súvrstvia (obr. 7B, C) a menej často aj piesky a štrkopiesky kolárovskeho súvrstvia (obr. 7D) alebo ílovité šošovky priamo v štrkopieskoch kvartérneho veku (obr. 7E). V rôznych častiach Dunajskej panvy je pravdepodobnosť výskytu jednotlivých variantov odlišná.



Záver

Nová koncepcia litostratigrafie Dunajskej panvy je (okrem výskumného potenciálu) dôležitým nástrojom na správnu interpretáciu praktických výsledkov inžiniersko-geologických, hydrogeologických a ložiskových geologických prieskumov. Poznatky o odlišnosti asociácií facií volkovského a beladického súvrstvia boli aplikované napríklad pri metaštúdii inžiniersko-geologických parametrov zemín neogénneho podložia v oblasti Bratislavy (Šujan et al., 2016b). Z hľadiska aplikovaných geologických disciplín je v budúcnosti potrebné vo vybraných častiach Dunajskej panvy určiť a podrobne dokumentovať oporné profily, ktoré môžu slúžiť ako parametrické body na interpretáciu štandardných vrtných prác. Využitím oporných profilov je možné významne zvýšiť efektivitu geologickej praxe a súčasne bezpečnosť technických riešení viazaných na výsledky geologického prieskumu vrátane ich ekonomiky (napr. manažment rizík ohrozenia kvality podzemnej vody, depozovanie odpadu, hydraulická ochrana stavebných jám a podobne). Výskum priestorovej distribúcie sedimentárnych facií a depozičných systémov vo výplni Dunajskej panvy dynamicky napreduje. Tým sa získavajú ďalšie údaje na spresňovanie a modifikácie prezentovanej koncepcie. Nové genetické prístupy pri definovaní súvrství boli aplikované aj na sukcesie skoro- a strednomiocénneho veku Dunajskej panvy (napr. Rybár et al., 2016; Kováč et al., 2018a; Šarinová et al., 2018), čo v budúcnosti umožní predstaviť



Obr. 7. Možné varianty sledu kvartérnych fluvialných štrkopieskov a podložných sedimentov volkovského, respektíve kolárovskeho súvrstvia. Predstavujú virtuálne (teoretické) vrtné profile v oblastiach mimo gabčíkovej depresie (napríklad Bratislava). Na základe výskytov pozorovaných v databáze vrtov pravdepodobnosť výskytu generálne klesá od A po E. Hrubé červené rozhranie zdôrazňuje potenciálny hydraulický kontakt priepustných telies. Volkovské súvrstvie je na okrajoch panvy uklonené o 3 – 5° v dôsledku pliocénnej inverzie panvy.

Fig. 7. Possible variants of a succession of Quaternary fluvial sands and gravels overlying the upper Miocene Volkovce Fm., or the Pliocene Kolárovo Fm., respectively. The variants represent virtual (theoretical) well-core profiles in the areas outside the central Gebčíkovo-Győr depression (e.g., Bratislava area). The probability of appearance is decreasing from A to E, as was observed from a database of boreholes. Bold red line indicates potential hydraulic contact of permeable geological units. The Volkovce Fm. is inclined towards the basin center with an angle of 3 – 5° due to the Pliocene basin inversion.

podobné prístupy pri charakteristike litostratigrafických jednotiek uvedeného veku.

PodĎakovanie

Tento výskum vznikol vďaka finančnej podpore Agentúry na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy číslo APVV-16-0121. Martin Šujan a Michal Kováč svojimi postrehmi a pripomienkami výrazne prispeli ku kvalite prvej verzie manuskriptu, za čo sme im vďační. Klement Fordinál a Alexander Nagy svojimi cennými pripomienkami v rámci recenzií umožnili zlepšiť manuskript z hľadiska úplnosti a faktickej správnosti, za čo im taktiež patrí vďaka. Výsledky umožňujúce novú definíciu litostratigrafických jednotiek spomínaných v texte mohli byť dosiahnuté vďaka komplexnej spolupráci s kolegami na Katedre geológie a paleontológie PriF UK, ako aj s kolegami z iných slovenských aj zahraničných pracovísk.

Literatúra

- Adam, Z. a Dlabáč, M., 1969: Vysvetlivky k mapám mocnosti a litofaciálneho vývoje Podunajskej pánve. Západ. Karpaty, 11, 156 – 172.
- Amorosi, A., Barbieri, G., Bruno, L., Campo, B., Drexler, T. M., Hong, W., Rossi, V., Sammartino, I., Scarponi, D., Vaiani, S. C. a Bohacs, K. M., 2019a: Three-fold nature of coastal progradation during the Holocene eustatic highstand, Po Plain, Italy – close correspondence of stratal character with distribution patterns. *Sedimentology*, doi:10.1111/sed.12621.
- Amorosi, A., Bruno, L., Campo, B., Costagli, B., Dinelli, E., Hong, W., Sammartino, I. a Vaiani, S. C., 2019b: Tracing clinothem geometry and sediment pathways in the prograding Holocene Po Delta system through integrated core stratigraphy. *Basin Research*, doi:10.1111/bre.12360.

- Aslan, A. a Autin, W. J., 1999: Evolution of the Holocene Mississippi river floodplain, Ferriday, Louisiana: insights on the origin of fine-grained floodplains. *J. Sed. Res.*, 69, 800 – 815.
- Athy, L. F., 1930: Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 14, 1 – 24.
- Baráth, I., Fordinál, K. a Pipík, R., 1999: Lacustrine to alluvial sedimentary cyclicity (Pannonian zone E, Danube Basin). *Geol. Carpath., Spec. Iss.*, 50, 14 – 16.
- Biela, A., 1978: Hlboké vrty v zakrytých oblastiach vnútorných Západných Karpát, 1. časť – Podunajská nížina. Bratislava, Geol. Úst. D. Štúra, 224 s.
- Buday, T., Cicha, I. a Hanzlíková, E., 1967: Regional Geology of the ČSSR, Western Carpathians, 2nd part, 2nd volume. Praha, Ústř. Úst. geol., 652 s.
- Campo, B., Amorosi, A. a Bruno, L., 2016: Contrasting alluvial architecture of Late Pleistocene and Holocene deposits along a 120-km transect from the central Po Plain (northern Italy). *Sedimentary Geol.*, 341, 265 – 275.
- Catuneanu, O., 2017: Sequence Stratigraphy: Guidelines for a Standard Methodology. In: Montanari, M. (Ed.): *Stratigraphy & Timescales, Advances in Sequence Stratigraphy 2*, Academic Press, 1 – 57.
- Fordinál, K., Nagy, A. a Vass, D., 2001: Problémy stratigrafie a litostratigrafie vrchného miocénu podunajskej panvy. *Miner. Slov.*, 1, 33, 7 – 14.
- Fordinál, K. a Tuba, L., 1992: Biostratigrafické a paleoekologické vyhodnotenie sedimentov územia centrálnej časti Bratislavy. *Geol. Práce, Spr.*, 96, 63 – 68.
- Hilgen, F. J., Lourens, L. J. a Van Dam, J. A., 2012: The Neogene Period. In: Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D., Ogg, G. (Eds.): *A Geologic Time Scale 2012*. Amsterdam, Elsevier, 923 – 978.
- Horváth, F., 1995: Phases of compression during the evolution of the Pannonian Basin and its bearing on hydrocarbon exploration. *Mar. Petrol. Geol.*, 12, 8, 837 – 844.

- Horváth, F., Bada, G., Szafián, P., Tari, G., Ádám, A. a Cloetingh, S., 2006: Formation and deformation of the Pannonian Basin: constraints from observational data. *Mem. Geol. Soc. London*, 32, 1, 191 – 206.
- Janáček, J., 1969: Nové stratigrafické poznatky o pliocénnej a pleistocénnej výplni centrálnej časti Podunajskej nížiny. *Geol. Práce, Spr.*, 50, 113 – 131.
- Janáček, J., 1971: K tektonice pliocénu ve střední části Podunajské nížiny. *Geol. Práce, Spr.*, 55, 65 – 85.
- Janoschek, R., 1943: Das Pannon des Inneralpinen Wiener Beckens. In: *Zur Stratigraphie des Jungtertiärs der Donauländer*. Mitt. Reichsamts Bodenforsch. (Wien), 1 – 45.
- Jipa, D. C., Cornel, O., Marinescu, N., Olteanu, R. a Brustur, T., 2007: A Late Neogene marker sequence in the Dacian Basin (Paratethys realm): Genetic and stratigraphic significance. *Geo-Eco-Marina*, 13, 121 – 138.
- Jíříček, R., 1974: Biostratigrafia pliocénu komjatickej depresie. Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra.
- Joniak, P., Šujan, M., Fordinál, K., Braucher, R., Rybár, S., Kováčová, M., Kováč, M., Aumaître, G., Bourlès, D. L. a Keddadouch, K., 2020: The age and paleoenvironment of a late Miocene floodplain alongside Lake Pannon: Rodent and mollusk biostratigraphy coupled with authigenic $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ dating in the northern Danube Basin of Slovakia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 538, 109 – 482.
- Juhász, Gy., 1994: Comparison of the sedimentary sequences in Late Neogene subbasins in the Pannonian Basin, Hungary. *Földt. Közl.*, 124, 341 – 365.
- Juhász, Gy., Pogácsá, Gy., Magyar, I. a Vakarc, G., 2007: Tectonic versus climatic control on the evolution of fluvial-deltaic systems in a lake basin, Eastern Pannonian Basin. *Sedimentary Geol.*, 202, 72 – 95.
- Kováč, M., 2000: Geodynamický, paleogeografický a štruktúrny vývoj karpatsko-panónskeho regiónu v miocéne: nový pohľad na neogénne panvy Slovenska. Bratislava, Veda, Vyd. Slov. Akad. Vied, 202 s.
- Kováč, M., Baráth, I., Fordinál, K., Grigorovich, A. S., Halássová, E., Hudáčková, N., Joniak, P., Sabol, M., Slamková, M., Sliva, L. a Vojtko, R., 2006: Late Miocene to Early Pliocene sedimentary environments and climatic changes in the Alpine-Carpathian-Pannonian junction area: A case study from the Danube Basin northern margin (Slovakia). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 238, 32 – 52.
- Kováč, M., Halássová, E., Hudáčková, N., Holcová, K., Hyžný, M., Jamrich, M. a Ruman, A., 2018b: Towards better correlation of the Central Paratethys regional time scale with the standard geological time scale of the Miocene Epoch. *Geol. Carpath.*, 69, 3, 283 – 300.
- Kováč, M., Rybár, S., Halássová, E., Hudáčková, N., Šarinová, K., Šujan, M., Baranyi, V., Kováčová, M., Ruman, A., Klučiar, T. a Zlinská, A., 2018a: Changes in Cenozoic depositional environment and sediment provenance in the Danube Basin. *Basin Res.*, 30, 97 – 131.
- Kováč, M., Synak, R., Fordinál, K. a Joniak, P., 2010: Významné eventy v paleogeografii severnej časti Dunajskej panvy – nástroj na upresnenie stratigrafie jej vrchnomiocénnej a pliocénnej výplne. *Acta Geol. Slov.*, 2, 1, 23 – 35.
- Kováč, M., Synak, R., Fordinál, K., Joniak, P., Tóth, C., Vojtko, R., Nagy, A., Baráth, I., Maglay, J. a Minár, J., 2011: Late Miocene and Pliocene history of the Danube Basin: Inferred from development of depositional systems and timing of sedimentary facies changes. *Geol. Carpath.*, 62, 6, 519 – 534.
- Lewin, J. a Ashworth, P. J., 2014: The negative relief of large river floodplains. *Earth Sci. Rev.*, 129, 1 – 23.
- Lyell, Ch., 1872: *Principles of Geology*. Eleventh edition. London, John Murray, 652 s.
- Magyar, I., Geary, D. H. a Müller, P., 1999: Paleogeographic evolution of the Late Miocene Lake Pannon in Central Europe. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 147, 151 – 167.
- Magyar, I., Lantos, M., Ujszaszi, K. a Kordos, L., 2007: Magnetostratigraphic, seismic and biostratigraphic correlations of the Upper Miocene sediments in the northwestern Pannonian Basin System. *Geol. Carpath.*, 58, 3, 277 – 290.
- Magyar, I., Müller, P., Geary, D. H., Sanders, H. C. a Tari, G., 2000: Diachronous deposits of Lake Pannon in the Kisalföld basin reflect basin and mollusc evolution. *Abh. Geol. Bundesanst.*, 56, 669 – 678.
- Magyar, I., Radivojević, D., Sztanó, O., Synak, R., Ujszászi, K. a Pócsik, M., 2013: Progradation of the paleo-Danube shelf margin across the Pannonian Basin during the Late Miocene and Early Pliocene. *Global Planet. Change*, 103, 168 – 173.
- Maros, G., Albert, G., Szeiler, R. B., Fodor, L., Gyalog, L., Jochá-Edelényi, E., Kercsmár, Zs., Magyar, Á., Maigut, V., Nádor, A., Orosz, L., Palotás, K., Selmečzi, I., Uhrin, A., Viktor, Zs., Atzenhofer, B., Berka, R., Bottig, M., Brüstle, A., Hörfarer, C., Schubert, G., Weilbold, J., Baráth, I., Fordinál, K., Kronome, B., Maglay, J., Nagy, A., Jelen, B., Lapanje, A., Rifelj, H., Rižnar, I. a Trajanova, M., 2012: Summary report of the Geological Models Transenergy Project, TransEnergy – Transboundary Geothermal Energy Resources of Slovenia, Austria, Hungary and Slovakia, 189 s. Dostupné online na: <http://transenergy-eu.geologie.ac.at/>.
- Miall, A. D., 2006: *The geology of fluvial deposits: Sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Berlin, Springer, 524 s.
- Nagy, A., Fordinál, K., Brzobohatý, R., Uher, P. a Raková, J., 1995: Vrchný miocén juhovýchodného okraja Malých Karpát (vrt Ma-1, Bratislava). *Miner. Slov.*, 27, 2, 113 – 132.
- Nagy, A., Herrman, P., Peregi, Z., Császár, G., Tkáčová, H. a Pereszlenyi, M., 1998a: Lithofacies and thickness map of the Pannonian 1 : 200 000. Atlas of Danube Region Environmental Geology (DANREG) program, Budapest.
- Nagy, A., Herrman, P., Peregi, Z., Császár, G., Tkáčová, H. a Pereszlenyi, M., 1998b: Lithofacies and thickness map of the Pontian-Pliocene 1 : 200 000. Atlas of Danube Region Environmental Geology (DANREG) program, Budapest.
- Nagy, A., Peregi, Z. a Herrmann, P., 2000: Lithofacies and Thickness Maps of Pannonian and Pontian-Pliocene at a scale 1 : 200 000. In: Császár, G. (Ed.): *Explanatory Notes for Atlas of Danube Region Environmental Geology (DANREG) program*, Budapest. *Jb. Geol. Bundesanst. (Wien)*, 42, 4, 457 – 464.
- Pillans, B. a Gibbard, P. L., 2012: The Quaternary Period. In: Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. a Ogg, G. M., (Eds.): *The Geologic Time Scale 2012*. Amsterdam, Elsevier, 979 – 1 010.
- Placer, L., 1999: Structural meaning of the Sava folds. *Geologija*, 41, 191 – 221.
- Priehodská, Z. a Harčár, J., 1988: Vysvetlivky ku geologickej mape severovýchodnej časti Podunajskej nížiny 1 : 50 000. Bratislava, Geol. Úst. D. Štúra, 1 – 114.
- Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Braucher, R., Novothny, Á., Csillag, G., Fodor, L., Molnár, G. a Madarász, B., 2016: Tectonic and climatic control on terrace formation: Coupling in situ produced ^{10}Be depth profiles and luminescence approach, Danube River, Hungary, Central Europe. *Quat. Sci. Rev.*, 131, 127 – 147.
- Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Csillag, G., Fodor, L., Braucher, R., Novothny, Á., Thamó-Bozsó, E., Virág, A., Pazonyi, P. a Timár, G., 2018: Integration of new and revised chronological data to constrain the terrace evolution of the Danube River (Gerece Hills, Pannonian Basin). *Quat. Geochronol.*, 48, 148 – 170.
- Rybár, S., Kováč, M., Šarinová, M., Halássová, E., Hudáčková, N., Šujan, M., Kováčová, M., Ruman, A. a Klučiar, T., 2016:

- Changes in Neogene paleogeography, paleoenvironment and the provenance of sediment in the northern Danube Basin. *Bull. Geosci.*, 91, 2, 367 – 398.
- Steininger, F. F., Seneš, J., Kleemann, K. a Rögl, F., 1985: Neogene of the Mediterranean Tethys and Paratethys, Vol. 2. Austria, H. Peter Press, 534 s.
- Stoica, M., Lazăr, I., Krijgsman, W., Vasiliev, I., Jipa, D. a Floroiu, A., 2013: Paleoenvironmental evolution of the East Carpathian foredeep during the late Miocene – early Pliocene (Dacian Basin; Romania). *Global Planet. Change*, 103, 1, 135 – 148.
- Stoica, M., Lazăr, I., Vasiliev, I. a Krijgsman, W., 2007: Mollusc assemblages of the Pontian and Dacian deposits from the Topolog-Argeș area (southern Carpathian foredeep – Romania). *Geobios*, 40, 3, 391 – 405.
- Syvitski, J. P. M., Overeem, I., Brakenridge, G. R. a Hannon, M., 2012: Floods, floodplains, delta plains – a satellite imaging approach. *Sedimentary Geol.*, 267 – 268, 1 – 14.
- Sztanó, O., Kováč, M., Magyar, I., Šujan, M., Fodor, L., Uhrin, A., Rybár, S., Csillag, G. a Tökés, L., 2016: Late Miocene sedimentary record of the Danube/Kisalföld Basin: Interregional correlation of depositional systems, stratigraphy and structural evolution. *Geol. Carpath.*, 67, 525 – 542.
- Sztanó, O., Magyar, I., Szónoky, M., Lantos, M., Müller, P., Lenkey, L., Katona, L. a Csillag, G., 2013a: Tihany Formation in the surroundings of Lake Balaton: Type locality, depositional setting and stratigraphy. *Földt. Közl.*, 143, 1, 73 – 98.
- Sztanó, O., Szafián, P., Magyar, I., Horányi, A., Bada, G., Hughes, D. W., Hoyer, D. L. a Wallis, R. J., 2013b: Aggradation and progradation controlled clinoforms and deep-water sand delivery model in the Neogene Lake Pannon, Makó Trough, Pannonian Basin, SE Hungary. *Global Planet. Change*, 103, 149 – 167.
- Šarinová, K., Rybár, S., Halássová, E., Hudáčková, N., Jamrich, M., Kováčová, M. a Šujan, M., 2018: Integrated biostratigraphical, sedimentological and provenance analyses with implications lithostratigraphic ranking: the Miocene Komjatice Depression of the Danube Basin. *Geol. Carpath.*, 69, 4, 382 – 409.
- Šujan, M., 2015: Metodika morfostratigrafického členenia riečnych terás na Slovensku: polemika k používaniu alpského glaciálneho členenia. *Miner. Slov.*, 47, 1, Geovest., 17 – 19.
- Šujan, M. a Rybár, S., 2014: Vývoj pleistocénnych riečnych terás vo východnej časti Dunajskej panvy. *Acta Geol. Slov.*, 6, 107 – 122 (in Slovak with English summary).
- Šujan, M., Braucher, R., Kováč, M., Bourlès, D. L., Rybár, S., Guillou, V. a Hudáčková, N., 2016a: Application of the authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ dating method to Late Miocene-Pliocene sequences in the northern Danube Basin (Pannonian Basin System): Confirmation of heterochronous evolution of sedimentary environments. *Global Planet. Change*, 137, 35 – 53.
- Šujan, M., Braucher, R., Rybár, S., Maglay, J., Nagy, A., Fordinál, K., Šarinová, K., Sýkora, M., Józsa, Š. a Kováč, M., 2018: Revealing the late Pliocene to Middle Pleistocene alluvial archive in the confluence of the Western Carpathian and Eastern Alpine rivers: $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ burial dating from the Danube Basin (Slovakia). *Sedimentary Geol.*, 377, 131 – 146.
- Šujan, M., Braucher, R., Tibenský, M., Fordinál, K., Rybár, S. a Kováč, M., 2020: Effects of spatially variable accommodation rate on channel belt distribution in an alluvial sequence: Authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ -based Bayesian age-depth models applied to the upper Miocene Volkovce Fm. (northern Pannonian Basin System, Slovakia). *Sedimentary Geol.*, 397, 105 – 566.
- Šujan, M., Kováč, M., Hók, J., Šujan, M., Braucher, R., Rybár, S. a De Leeuw, A., 2017: Late Miocene fluvial distributary system in the northern Danube Basin (Pannonian Basin System): depositional processes, stratigraphic architecture and controlling factors of the Piešťany Member (Volkovce Formation). *Geol. Quarterly*, 61, 521 – 548.
- Šujan, M., Slávik, I., Galliková, Z., Dovičín, P. a Šujan, M., 2016b: Pre-Quaternary basement of Bratislava (part 1): genetic vs. geotechnical characteristics of the Neogene foundation soils. *Acta Geol. Slov.*, 8, 71 – 86.
- Timár, G., 2001: Controls on channel sinuosity changes: a case study of the Tisza River, the Great Hungarian Plain. *Quater. Sci. Rev.*, 22, 2 199 – 2 207.
- Vass, D., 2002: Litostratigrafia Západných Karpát: neogén a budínsky paleogén. Bratislava, Št. Geol. Úst. D. Štúra, 200 s.
- Vass, D., Peresztlényi, M., Kováč, M. a Král, M., 1990: Out-line of Danube Basin geology. *Földt. Közl.*, 120, 193 – 214.
- Vandenberghe, J., 2008: The fluvial cycle at cold-warm-cold transitions in lowland regions: A refinement of theory. *Geomorphology*, 98, 3 – 4, 275 – 284.
- Vespremeanu-Stroe, A., Zăinescu, F., Preoteasa, L., Tatui, F., Rotaru, S., Morhange, C., Stoica, M., Hanganu, J., Timar-Gabor, A., Cărdan, I. a Piotrowska, N., 2017: Holocene evolution of the Danube delta: An integral reconstruction and a revised chronology. *Mar. Geol.*, 388, 38 – 61.
- Zámolyi, A., Székely, B., Draganits, E. a Timár, G., 2010: Neotectonic control on river sinuosity at the western margin of the Little Hungarian Plain. *Geomorphology*, 122, 231 – 243.

Summary

The paper presents an advance in lithostratigraphy of the upper Miocene to Quaternary successions of the Danube- Kisalföld Basin (Fig. 1; western Slovakia), which was achieved in the last decades, and its potential effects on the applied geological tasks. The original lithostratigraphic conception assumed each formation as a separate depositional sequence bounded by transgression and regression, and included in the Central Paratethys Stages like Pannonian, Pontian, Dacian, Romanian (Fig. 2) (e.g., Buday et al., 1967; Adam and Dlabač, 1969; Biela, 1978; Prieckhodská and Harčár, 1988; Vass et al., 1990; Vass, 2002). The upper Miocene formations were newly defined based on sedimentological criteria (Fig. 3) (Kováč et al., 2010, 2011; Sztanó et al., 2016; Šujan et al., 2016, 2020; Joniak et al., 2020), hence (1) the Ivanka Fm. comprises deep lacustrine, turbiditic, shelf slope, and open shallow lacustrine facies, (2) the Belatice Fm. includes deltaic and coastal facies, while (3) the Volkovce Fm. includes alluvial facies. This group of depositional systems was connected by delivery of sediment and therefore prograded in time across the basin, what caused (1) diachrony of the formation boundaries and (2) accumulation of several formations synchronously, what previous conceptions did not allow. The upper Miocene deposition of the alluvial Volkovce Fm. was interrupted by the Pliocene basin inversion ca. six million years ago, what was followed by accumulation of the alluvial Pliocene Kolárovo Fm. and the alluvial Quaternary deposits (Fig. 4) (Šujan et al., 2018). The conditions of sediment supply and accommodation rate changed temporally and spatially across the basin, hence all three alluvial formations: Volkovce Fm., Kolárovo Fm. and the Quaternary alluvial deposits are significantly variable in vertical and lateral sense. Therefore, these formations may contain very similar facies and differ only with the probability of the occurrence of

specific facies, mainly by the means of channel fill (sandy and gravelly) and floodplain (silty and clayey) facies ratio. As documented by the Fig. 5 and 6, visually comparable facies were observed both in upper Miocene and Quaternary strata of the Danube Basin area. An implication of the described conception is that sedimentary successions few meters thick documented on outcrops and in well-cores could not be assigned to a lithostratigraphic unit without having statistically significant data of local geological setting or having biostratigraphic and/or geochronological data.

The mentioned facts have significant impact on the applied geological surveys, such as engineering-geology, hydrogeology, environmental tasks and landfill management. The typical stratigraphic succession outside the central Gabčíkovo-Győr depression comprise 10 – 20 m thick fluvial gravels and sands of the Quaternary age, which overlie muddy floodplain facies of the upper Miocene Volkovce Fm. (Fig. 7A). However, sandy channel belt facies of the Volkovce Fm. occur commonly below the Quaternary

strata, and their hydraulic connectivity can be complicated due to the angular contact of the Miocene and Quaternary deposits, caused by the Pliocene basin inversion (Fig. 7B, C). The Kolárovo Fm. channel fill facies are less commonly present below the Quaternary sands and gravels but might cause severe complications for example in the case of a building foundation (Fig. 7D) (Šujan et al., 2016). An uncommon but existing scenario includes a lens of floodplain strata within the Quaternary channel fill gravels and sands (Fig. 7E). The described possibilities of successions are based on documented examples and should serve as a remind to not use simple generalizations in applied geological surveys and to use detailed studies based on statistically significant amount of data, when assuming geometry of sedimentary boundaries and properties such as permeability of sedimentary bodies.

Manuskript doručený:	25. 3. 2020
Revidovaná verzia doručená:	23. 4. 2020
Rukopis akceptovaný redakčnou radou:	7. 5. 2020