

Jan JELÍNEK*

**MORFOSTRUKTURNÍ ANALÝZA JAKO VHODNÁ METODA STUDIA
STRUKTURNĚ-GEOLOGICKÉ STAVBY APLIKOVANÁ NA PŘÍKLADU
MORAVSKOSLEZSKÉ OBLASTI**

MORFOSTRUCTURAL ANALYSIS AS A RIGHT METHOD OF GEOLOGY STRUCTURE
STUDYING APPLIED AT REPRESENTATIVE MORAVOSILESIAN AREA

Abstrakt

Moravskoslezská oblast Českého masivu je výjimečná superpozicí tří strukturních pater. Morfostrukturní analýza zóny vzájemného ovlivnění kadomského, variského a alpského orogénu vychází z 3D vizuální konfrontace digitálních modelů reliéfu (DMR) jednotlivých strukturních pater s výsledky strukturně-tektonického mapování. Srovnávací morfostrukturní analýza v řadě případů ukázala značnou geometrickou a genetickou korelaci mezi morfostrukturním plánem současného epialpínského reliéfu Vnějších Karpat a strukturním plánem hornoslezské pánve. Výsledky morfostrukturní analýzy dokládají významnou a dosud nekvantifikovanou roli alpské rejuvenace variských zlomových struktur během nasouvání příkrovů alpského orogénu. Toto oživení vyvolalo interferenci tektonické role brunovistulika, které indukovalo dynamický a kinematický vývoj příkrovů Vnějších Karpat, s jeho vnitřním strukturním plánem. Současné sedimentární a tektonické zatěžování sedimenty vněkarpatské předhlubně a příkrovy Vnějších Karpat ovlivnilo vývoj korové flexury alpského předpolí a především reaktivizaci pohybů na zlomech východozápadního směru. Zřetelné tektonické podrotování korových segmentů (tilting) brunovistulika je typickým příkladem křehkých deformací při flexurovitěm ohybu zemské kůry.

Abstract

The Moravosilesian zone of the Bohemian Massif is a unique case due to superposition of three structural levels. The morphostructural analysis of zone of interaction between Cadomian, Variscan and Alpine orogeny is based on 3D visual comparison between interpretation of digital terrain models (DTM) of particular structural levels and results of structural-tectonic mapping. In many aspects, very good geometric correlation between the morphostructural pattern of the present epi-Alpine relief of Outer Carpathian belt and structural framework of the Upper Silesian Coal Basin was demonstrated by comparative morphostructural analysis. Results support significant and so far not well quantified role of the Alpine rejuvenation of the Variscan fault structures during the nappe thrusting of Alpine orogeny. This rejuvenation, which induced dynamic and kinematic development of the Outer Carpathians nappes, brought about interference of the tectonic role of the Brunovistulian basement with its inner structural framework. The coincident sedimentary and tectonic loading by sediments of Inner Carpathian Molasses and by nappes of Outer Carpathian belt influenced development of a lithospheric flexure of Alpine foreland and mainly a rifting activation of subequatorial fault systems. The distinct tilting (bookshelf tectonic block rotation) is typical brittle deformation of rigid Brunovistulian basement that followed genesis of asymmetric lithospheric flexure.

Key words: digital terrain model (DTM), rejuvenation, lithospheric flexure, tilting.

* Ing., Ph.D., HGF VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, e-mail: jan.jelinek@vsb.cz

Úvod

Zájmová moravskoslezská oblast reprezentuje v rámci geologické stavby Evropy výjimečný příklad vzájemného styku tří orogénů. Nejstarší strukturní patro zastoupené brunovistulíkem představuje společné předpolí pro variské i alpínské strukturní patro. Tento kadomský mikrokontinent sehrál významnou roli při formování variského akrečního klínu, který byl do oblasti nasunut přibližně od SZ. Variské strukturní patro reprezentované sedimenty rhenohercynika a subvariscika společně s brunovistulíkem tvoří předpolí pro strukturní patro alpínské, zastoupené sedimenty vněkarpatské předhlubně a příkrovy Vnějších Karpat, které byly do oblasti nasunuty generálně od JV až J.

Oblast vzájemného styku tří sledovaných strukturních pater (kadomského, variského a alpínského) je velmi rozsáhlá a není možné provádět podrobnou morfostrukturní analýzu v celém jejím rozsahu. Bylo proto vybráno takové reprezentativní území, které mohlo poskytnout nejvíce informací o geologické historii a vzájemné strukturní interakci těchto pater. Podstatným kritériem výběru oblasti byla její dosavadní míra prozkoumanosti. Vzhledem k charakteru prováděných analýz, bylo nezbytné vybrat průnikovou oblast, ve které by byla k dispozici potřebná data všech tří strukturních pater. Jejich dostupnost zvláště ze zakrytých pater (brunovistulíkem) nebo jejich částí (variské strukturní patro – zakrytá část hornoslezské pánve), se stala pro výběr rozhodující. Vybraný region zaujímá přibližně 24 000 km². Pro takto rozsáhlé území byl vytvořen podrobný digitální model současného reliéfu (obr. 1), který zahrnuje území východní části Slezska, severní části Moravy, přilehlé západní části Slovenska a jižní části Polska.

Označení studovaného území za moravskoslezskou oblast jsem zde použil s plným vědomím, že se shoduje s regionálně-geologickým členěním Českého masivu podle návrhu z roku 1979 in Mísař et al. (1983). Výraz „oblast“ je chápán na úrovni geografického územního členění Moravy a Slezska. Zvoleným názvem není míněno pouze území odkrytých jednotek moravskoslezské oblasti, ale také území pod pokryvnými útvary okrajové části vnějších Západních Karpat nacházející se především na území České republiky.

Současný stav poznání

Strukturně tektonickými poměry variského případně alpínského strukturního patra moravskoslezské oblasti se zabývala dlouhá řada autorů (např. Buday et al. 1961, 1997; Dopita et al. 1997; Dvořák 1982; Grygar, Vavro 1995; Grygar 2001; Jura 1995; Kumpere 1983, 1989; Menčík et al. 1983; Neubauer et al. 1997; Potfaj 1998; Rakús 1998; atd.). Problematice vzájemného strukturně-tektonického ovlivnění obou orogénů se většina autorů věnovala jen okrajově. Výjimkou jsou práce Petránka (1954), který se na základě studia poznatků z důlní činnosti v ostravsko-karvinském revíru zmiňoval o významném vlivu terciární tektoniky na formování strukturní stavby variského patra. Zcela správně uváděl, že v důsledku vývoje vněkarpatské předhlubně a nasunutí příkrovů Vnějších Karpat došlo k oživení pohybů na varisky založených zlomech západo-východního směru, které podmínily hrášťovou stavbu ostravsko-karvinského revíru.

Výsledky provedené morfostrukturní analýzy do značné míry potvrdily některé Petránkovy (1954) úvahy o vlivu mladočtveřihorní tektoniky na strukturně-tektonické poměry variského akrečního klínu a o tektonické stavbě ostravsko-karvinského revíru. Bohužel mnozí autoři, kteří publikovali mnohem později, jeho názory plně neakceptovali. Nový pohled na tuto problematiku přinesl až grant GAČR č. 205/00/1182 „Strukturní a morfostrukturní vztahy a vzájemné tektonické ovlivnění variského a alpínského orogénu - moravskoslezská oblast Českého masivu“ (Grygar, Jelínek 2002b).

Morfologická studie vnitřní architektury jednotlivých strukturních etází prostřednictvím analýzy digitálních modelů reliéfu (DMR), zaměřena na studium strukturně-tektonických vztahů obou orogénů, nebyla dosud v zájmové oblasti provedena. V současné době ani neexistuje ucelený metodický postup morfostrukturní analýzy založené na studiu DMR.

Metodické postupy

Výzkum morfostrukturního vývoje byl založen na principu srovnávacího studia variského a alpínského strukturního plánu. Sledovaly se neoidní vlivy alpínské tektoniky na variské strukturní patro, které reprezentuje předpolí vněkarpatských příkrovů. Současně byl posuzován vliv variské tektoniky na strukturní vývoj alpínského patra. Rozhodující důraz byl kladen na studium křehké tektoniky, tedy především zlomovou stavbu a puklinové systémy. Jednotlivé variské a alpínské deformace byly podrobně klasifikovány a kvantifikovány. Vhodně

vybraný region širší oblasti hornoslezské pánve, zachycující současně variské strukturní patro a na něm nasunutě příkrovy alpského strukturního patra, umožňuje korelovat jednotlivé tektonické poruchy obou pater.

Zhodnocení vzájemných strukturně tektonických vztahů si vyžádalo nalezení neoptimálnějších metod studia, které umožňovaly klasifikaci a kvantifikaci křehkých deformací jednotlivých strukturních pater. Stanovený metodický přístup obsahuje celou řadu různých analýz využívajících komplexního zpracování strukturně - tektonických databází a počítačové grafiky, jejichž vzájemně konfrontované výstupy vedly k dosažení nejlepších výsledků a prověření správnosti hypotéz (Jelínek 2003). Přijatý celkový přístup k řešení daného úkolu a výběr metod vychází ze studia reliéfu jednotlivých strukturních etází.

Metodický přístup řešení úkolu je založen na kombinaci vhodných analýz, které nahlíží na problematiku z různých úhlů. Vzájemným porovnáním jejich výsledků jsou vyvozeny závěry s vyšším stupněm věrohodnosti. Mezi vhodné analýzy byly zahrnuty tyto:

- morfostrukturní analýza založená na principu studia DMR,
- vybrané morfometrické analýzy,
- strukturní a paleonapěťová analýza,
- metody dálkového průzkumu Země (DPZ) zaměřené na výzkum strukturně- tektonických prvků reliéfu.

Požadované nároky nejlépe splnila morfostrukturní analýza založená na principu vizuální interpretace DMR. Metoda s využitím výpočetní techniky umožňuje jako jediná z navrhovaných řešit vzájemné ovlivnění jednotlivých strukturních pater i v místech, kde se tato patra vzájemně překrývají. Široké možnosti výpočetní techniky v oblasti 3D vizualizace dovolují názorné prostorové zobrazení jednotlivých strukturních pater a tedy mnohem snadnější kvalitativní posouzení jejich vzájemného strukturního ovlivnění. Morfostrukturní analýza tvoří hlavní metodický přístup k řešení úkolu doplněný o vybrané morfometrické analýzy, strukturní a paleonapěťovou analýzu a některé metody DPZ (Jelínek 2003).

Morfostrukturní analýza

Morfostrukturní analýza DMR jednotlivých strukturních pater, zaměřená na křehké porušení horninového masivu, odhalila v konfrontaci s geologickými poznatky složité strukturní vztahy a vazby mezi jednotlivými strukturními patry. Při takto zaměřeném studiu je nezbytné si všimnout všech krajinných tvarů, příznačných geometrických rysů (např. přímý průběh údolí, shodně orientovaná říční a údolní síť s náhlými změnami směru, soustavy horských hřbetů, dvojité vrcholy atd.), které mají vazbu na jejich tektonický původ (Ahnert 1998; Bloom 1998; Ritter et al. 2002 atd.). Zvýšená pozornost proto byla věnována zjištění regionálních tektonických poměrů, které napomáhají k vysvětlení složitějšího tektonického vývoje celé oblasti. Nicméně je nutné při analýze postupovat obezřetně. Některé struktury se v reliéfu jeví pouze nepřímě (např. v půdorysu říční sítě), nebo mají projev v modelu podobný jako tektonické poruchy, ale ve skutečnosti jejich geneze může být spojena se zcela jinými procesy vzniku reliéfu.

Morfometrická analýza

Morfometrická analýza jako doplněk morfostrukturní analýzy byla zvolena na základě předpokladu, že mezi morfometrickými a genetickými formami reliéfu existuje na všech úrovních významný vzájemný vztah, v důsledku čehož jsou morfometrické parametry reliéfu důležitými charakteristikami jeho genetických tvarů. Povrchové tvary zemské kůry mají svoji geometrii, z které se potom matematicky odvozují morfometrické veličiny reliéfu (Kreho 1990).

Morfometrická analýza poskytuje celou řadu informací o reliéfu, což je důvodem jejího tak širokého uplatnění. Úkolem bylo nalezení takových prvků reliéfu, které ukazují na jeho tektonický původ vzniku. Tento typ informací poskytuje mapa sklonitosti svahů a mapa orientace svahů. Morfometrická analýza DMR umožňuje velmi rychle analyzovat různé morfometrické údaje, provádět analýzy sklonitosti svahů, relativních výšek, hustoty forem a různé charakteristiky členění reliéfu. Kvantitativní analýza svahů může poskytnout podklady pro studium jednotlivých svahových charakteristik (Bloom 1998). Mapa sklonitosti reliéfu je důležitá k pochopení vývoje reliéfu. Informace o velikosti sklonu a směru svahu jsou nezbytné pro mnoho geomorfologických studií. Tyto mapy poskytují souhrnný pohled na studovanou oblast a umožňují kvantitativně porovnat a analyzovat rozdíly v oblasti.

Morfometrická analýza prováděná na základě digitálních modelů reliéfu vychází z předpokladu, že vytvořený model je maximálně podobný skutečnému reliéfu zkoumané oblasti. Chyba výstupů morfometrické

analýzy je přímo úměrná použitému typu digitálního modelu a jeho přesnosti vytvoření. Přesnost digitálních modelů závisí na přesnosti vstupních dat, jejich hustotě a typu použitého interpolačního algoritmu. Nejčastější výstupy morfometrické analýzy prováděné na digitálních modelech reliéfu jsou mapa výškových hladin reliéfu, mapa sklonitosti svahu a mapa orientace svahů k světovým stranám.

Strukturní a paleonapěťová analýza

Strukturní a paleonapěťová analýza použitá při řešení tohoto úkolu byla především zaměřena na křehké disjunktivní porušení skalního podkladu. Sloužila jako ověřovací a doplňková metoda k morfostrukturní analýze. Její výsledky měly potvrdit existenci dislokačních zón vizuálně interpretovaných morfostrukturní analýzou z DMR. Komplexní syntéza výsledků strukturní a paleonapěťové analýzy poskytuje představu o strukturním vývoji studované oblasti a o napětích, která vytvořila dnešní strukturní plán.

Zvýšená pozornost při terénním strukturně-tektonickém měření byla věnována především zlomům, lineárním prvkům na zlomových plochách a puklinovým systémům. Vzhledem k petrografickému charakteru hornin moravskoslezské oblasti bylo velmi obtížné nalézt vhodné lokality, kde by byl dostatek zachovaných indikátorů kinematiky pohybu na zlomu (Petit 1987), vhodných pro paleonapěťovou analýzu. Mnoho nalezených výchozů neposkytovalo dostatek zmíněných informací, a proto byla měření puklinových systémů využita pro určení dominantního systému křehkého porušení. V podmínkách kde strukturní znaky nutné pro zjištění dynamických podmínek vzniku geologických struktur nejsou dostatečně známy a nelze tedy provést plnohodnotnou genetickou klasifikaci struktur, mohou výsledky kinematické analýzy částečně zastoupit genetickou klasifikaci struktur.

Využití metod dálkového průzkumu Země

Dálkový průzkum Země (DPZ) v současné době využívá moderní technologie, které jsou schopny registrovat takové diagnostické prvky a detaily, které lidské oko nemůže běžně postřehnout. Využití těchto technologií při analýze leteckých a družicových snímků, které objektivně zachycují geologickou stavbu zemské kůry v širších souvislostech, umožňuje práci zefektivnit a podstatně urychlit. Dálkový průzkum zaměřený na výzkum strukturně-tektonických prvků reliéfu pomáhá v dešifrování role tektoniky a neotektoniky v morfologickém vývoji oblasti. Tímto výzkumem je možno vymezit významné strukturní prvky, hlavní tektonické linie, zlomy a jiné poruchové struktury. K jejich identifikaci slouží kvalitativní a kvantitativní parametry jako například lineární a paralelní hřbety a údolí, svahy, srázy, paralelní stěny příkopů, sedla, vodopády, terasy, hranice odlišného reliéfu atd. Tyto jednotlivé prvky krajiny a jejich vztah ke zlomům různých typů poskytují podrobnější znalost o hlavních tektonických pohybech a strukturním vývoji oblasti. Kombinací různých metod dálkového průzkumu s morfostrukturní analýzou DMR byly velmi detailně prozkoumány vzájemné vztahy mezi morfologií a tektonikou.

Správnost interpretace křehké tektoniky z reliéfu krajiny je závislá na podrobnosti DMR, měřítku leteckých snímků a hustotě družicových záznamů. V rámci hledání optimální metody řešení úkolu bylo provedeno srovnání vypovídacích schopností jednotlivých podkladů na vybraném malém území, pro které byl k dispozici DMR sestavený na základě digitalizace topografických map měřítko M 1:25 000, sada leteckých stereoskopických snímků měřítko M 1: 26 700 a sada družicových záznamů. Panchromatické družicové záznamy byly pořízeny družicí Landsat s rozlišením 15 m na pixel a multispektrální záznamy s rozlišením 30 m na pixel.

Obečným problémem při interpretaci leteckých snímků a družicových záznamů se stává vegetační kryt a urbanizace krajiny. Vegetace zakrývá drobné struktury, které mohou napomoci při interpretaci tektonických struktur přibližně přímého průběhu. Možnost prostorového studia geomorfologie reliéfu pomocí leteckých stereoskopických snímků, částečně eliminovala zmíněné problémy. Mnohem lepších výsledků bylo dosaženo interpretací DMR. Kromě regionálně významných tektonických struktur prvního a druhého řádu je možné interpretovat také mnohem drobnější struktury až pátého někdy i šestého řádu. DMR nezachycuje vegetační kryt a urbanistické celky, které mohou znesnadňovat interpretaci křehkého porušení masívu. Další významnou výhodou DMR je možnost aplikace morfostrukturních a morfometrických analýz, které přinášejí celou řadu důležitých informací o charakteru reliéfu. Vzhledem k uvedeným výhodám DMR a nevýhodám družicových multispektrálních záznamů, byly pro interpretaci křehkého porušení moravskoslezské oblasti použity zejména digitální modely reliéfu a letecké stereoskopické snímky.

Obr. 1 – barevný bude umístěn na šířku

Digitální modely reliéfu

DMR dnes představují jednu z hlavních složek procesu zpracování geografických dat. Tvoří základ pro celou řadu aplikací. Poskytují především digitální znázornění zpracované části povrchu vrstvy ve dvoudimenzionální ploše, ale umožňuje i různé názorné prostorové 3D vizualizace, vytváření virtuální reality, 3D animaci.

Použité DMR jednotlivých strukturních pater studované oblasti byly vytvořeny na základě dat pořízených detailní inteligentní digitalizací vrstevnicového plánu topografických map měřítka M 1:25 000 a důlních map měřítka M 1:100 000 (Aust et al. 1997). Tyto DMR jsou současně zasazeny do širšího regionálního rámce DMR střední Evropy, sestaveného na základě gridu GTOPO30. S využitím vizualizačních možností softwaru Surfer 8.0, a především GIS ArcInfo GIS 8.2 byly sestaveny pro interpretaci tyto 3D modely:

- přehledný DMR současného povrchu krajiny střední Evropy,
- DMR současného povrchu zachycující odkrytou část variského patra (Hrubý a Nízký Jeseník), alpínskou molasu a příkrovy Vnějších Karpat,
- DMR pohřbeného pre-alpínského povrchu v podloží alpínské molasy a vněkarpatských příkrovů,
- spojený DMR odkrytého a pohřbeného povrchu epivariského předpolí vněkarpatských příkrovů,
- DMR krystalinika brunovistulika v podloží paleozoických hornin.

Vzájemné strukturně tektonické porovnávání digitálních modelů jednotlivých strukturních pater bylo provedeno s ohledem na jejich rozdílnou přesnost s jakou reprezentují daný reliéf. Tato přesnost nezávisí pouze na typu použitých dat, jejich věrohodnosti a hustotě, ale také na použitém interpolačním algoritmu. Výběr nevhodnější interpolační metody byl proveden „bumerangovou metodou“ (Staněk 1999) a vizuálním porovnáním výsledného modelu s topografickou mapou. Oběma způsoby byla shodně vybrána metoda lineárního krigování izotropního datového pole (Yoeli 1977).

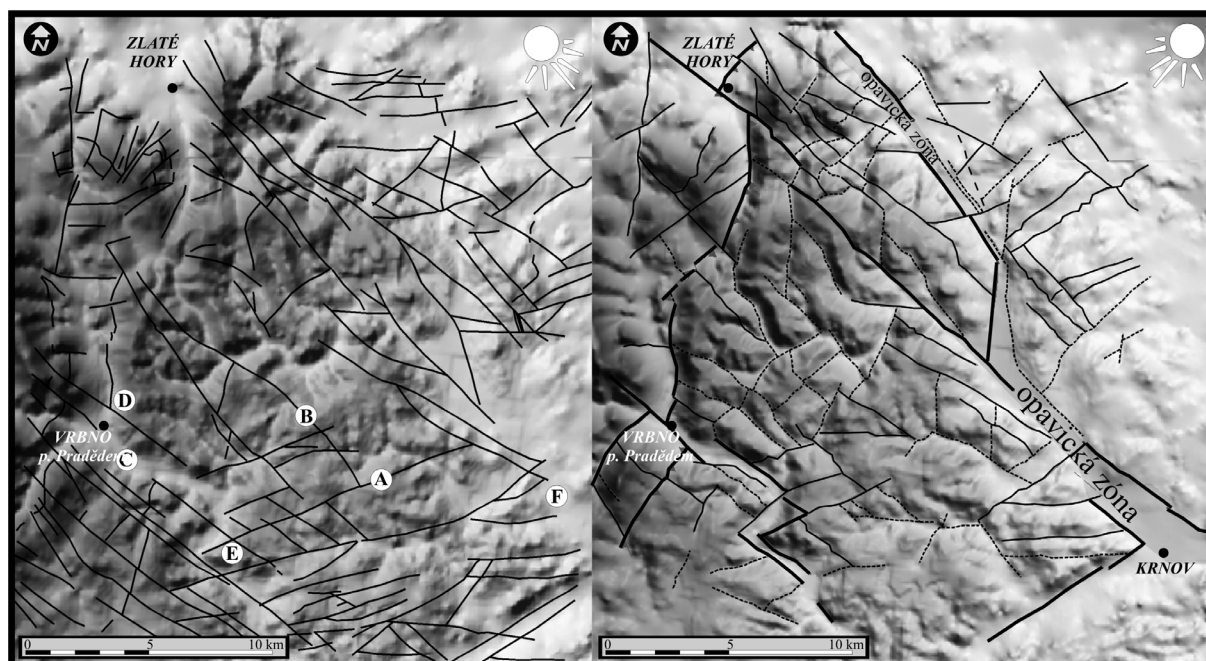
Přesnost DMR jednotlivých strukturních pater vytvořených pro tento úkol plně dostačuje účelu, pro který byly vytvořeny. Lze souhlasit s Weibelem a Hellerem (1991), že DMR jsou vhodné především pro studie reliéfu regionálního významu. Chceme-li vytvořit přesné modely detailních oblastí velkých měřítek, musí být vstupní data vzorkována s ohledem na interpolační metodu použitou při výpočtu modelu. Vyšší míra přesnosti interpolačních metod závisí na hustotě a typu vstupních dat. Síť vstupních bodů získaná „inteligentní“ digitalizací se musí pro takovéto detailní modely zahustit především v oblastech jednoduššího, rovinnatého charakteru, nebo se doplní o datový soubor obsahující digitalizované lomové linie reliéfu terénu, jako jsou údolnice, hřbetnice, paty svahů atd.

Metodické postupy interpretace DMR

Interpretace zlomové sítě pomocí morfostrukturní a morfometrické analýzy je založena na vizuální interpretaci digitálních modelů. Míra její věrohodnosti je závislá na přesnosti použitého modelu a především na lidském faktoru. Chyby způsobené nepřesností modelu lze odstranit. Mezi nejčastější nepřesnosti způsobené lidským faktorem patří interpretace zlomové sítě zatížená subjektivním názorem interpretátora. Abychom maximálně eliminovali takto vzniklé chyby, byl navržen následující postup interpretace zón křehkého porušení morfostrukturní a morfometrickou analýzou DMR (Jelínek 2003):

- Morfometrická analýza orientace svahů.
- Morfometrická analýza sklonitosti svahů.
- Morfostrukturní analýza DMR.
- Interpretace leteckých stereosnímků.
- Sloučení výsledků a jejich ověření.

Důležitou roli při interpretaci digitálních modelů reliéfu sehrává čas. Je-li interpretátor v časové tísní je pravděpodobné, že výsledek bude výrazněji zatížen chybami lidského faktoru. Mnohem vhodnější je provádět interpretaci v několika časově různých verzích. Ani zkušený interpretátor není schopen vytvořit interpretaci DMR pokaždé přesně stejnou zlomovou sítí. Tyto nepřesnosti souvisejí s detaily, kterých si interpretátor při dřívější nebo pozdější interpretaci modelu nevšiml. Proto je vhodnější provést interpretaci několikrát, a to s co možná nejdelším časovým rozestupem. Výsledky se navzájem porovnají a vyberou se shodné linie. Věrohodnost linií vyskytujících se pouze v jedné z verzí interpretace je nezbytné dodatečně posoudit. Přes tento postup nelze ovšem zcela potlačit subjektivní názor interpretátora.



Obr. 2: Porovnání výsledné sítě křehkého porušení (vpravo) se sítí zlomů digitalizovaných z geologické mapy M 1:50 000 (vlevo). Geologická mapa je zatížena těmito nepřesnostmi: A - zlomy jsou často vykresleny jako přímé linie nerespektující zakřivení reliéfu krajiny; B - umístění některých zlomů v souvislosti s jejich nepřesným vykreslením je sporné; C - zlomy formující údolí významnějších řek nejsou pod aluviálními sedimenty vykresleny; D - z vykreslené zlomové sítě není jasné, které zlomy jsou regionálně významnější; E - zlomy různých systémů se kříží, aniž by ovlivnily svůj vzájemný průběh; F - nejsou vykresleny některé významné zlomy, které výrazně ovlivňují ráz krajiny.

Navržený postup interpretace DMR obsahuje práci v krocích, které se nesmí vynechávat nebo měnit jejich pořadí. Porušením tohoto postupu by mohlo dojít k ovlivnění názoru interpretátora a snížení věrohodnosti interpretovaných zlomů.

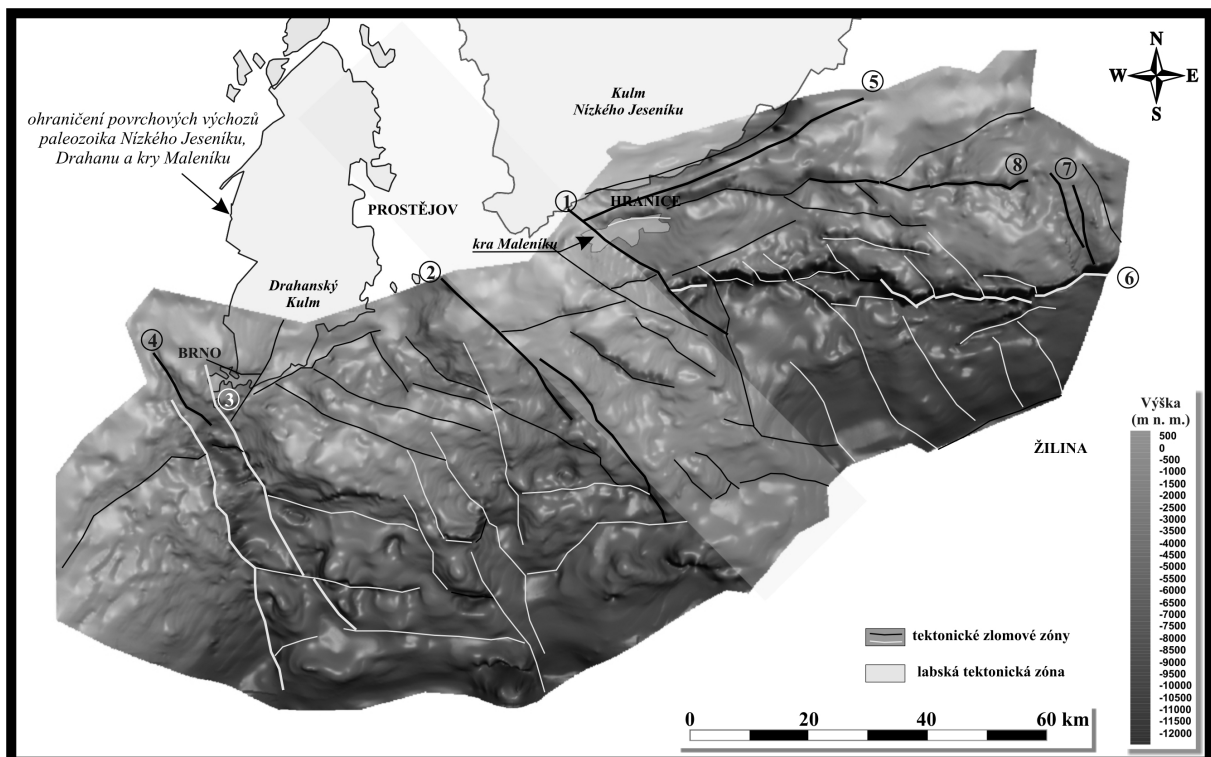
Metodický postup byl testován ve vybrané příkladové oblasti, pro kterou byly k dispozici požadované vstupní informace (DMR, geologické mapy měřítka 1:50 000, stereoskopické letecké snímky). Všechny tektonické směry zjištěné morfostrukturní analýzou DMR byly porovnány s mapovanými zlomy, zakreslenými v geologických mapách měřítka M 1:50 000. Vytvořené geologické mapy jsou bohužel do značné míry zatíženy nepřesnostmi. Zlomová síť v nich vykreslená není určující a nelze ji zcela použít pro ověření správnosti vytvořené sítě poruchových zón. Nově použité metodické postupy využívající možnosti výpočetní techniky odhalily v geologických mapách následující nejčastější nepřesnosti:

- A. zlomy jsou často vykresleny jako přímé linie nerespektující zakřivení reliéfu krajiny,
- B. umístění některých zlomů v souvislosti s jejich nepřesným vykreslením je sporné,
- C. zlomy formující údolí významnějších řek nejsou pod aluviálními sedimenty vykresleny,
- D. z vykreslené zlomové sítě není jasné, které zlomy jsou regionálně významnější,
- E. zlomy různých systémů se kříží, aniž by ovlivnily svůj vzájemný průběh,
- F. nejsou vykresleny některé významné zlomy, které výrazně ovlivňují ráz krajiny.

Porovnáním výsledné zlomové sítě zjištěné interpretací DMR a leteckých snímků se sítí zlomů digitalizovaných z geologické mapy měřítka M 1:50 000 (obr. 2) zjistíme, že byly rozpoznány nové průnikové linie zlomů s reliéfem, které se v geologických mapách nevyskytují, byť se významně podílejí na morfologii krajiny. Strukturně tektonickou analýzou je nutné ověřit, jak významně se uplatňují tyto nově zjištěné zlomy v geologické stavbě oblasti.

Vzájemné strukturálně tektonické ovlivnění variského a alpínského orogénu v moravskoslezské oblasti

Brunovistulikum, jako nejstarší strukturální patro moravskoslezské oblasti, sehrálo významnou roli nejen ve vývoji variského akrečního prizmatu, ale také mnohem později při vývoji alpínského akrečního klínu. Ze studia jeho DMR je zřejmé, že mezi dominantní struktury brunovistulika patří zlomy směru V-Z a SZ-JV (obr. 3). Nejvyšší část strukturální elevace brunovistulika (směru VSV-ZJZ) vytváří typickou strukturální rampu kosou k postupujícím variským násunům. V etapě variského sedimentárně-deformačního vývoje došlo k zablokování postupujících násunů na této elevaci a k následnému narotování průběhu variského vrásového systému do směru průběhu elevace v jižní části moravskoslezského paleozoika. Zmiňovaná strukturální elevace, s osou přibližně na linii Brno - Olomouc - Ostrava - Bielsko-Biala, zřetelně vystupuje v pozici struktury typu „foreland bulge“ vůči akrečnímu klínu flyšových Vnějších Karpat (Grygar et al. 2002).

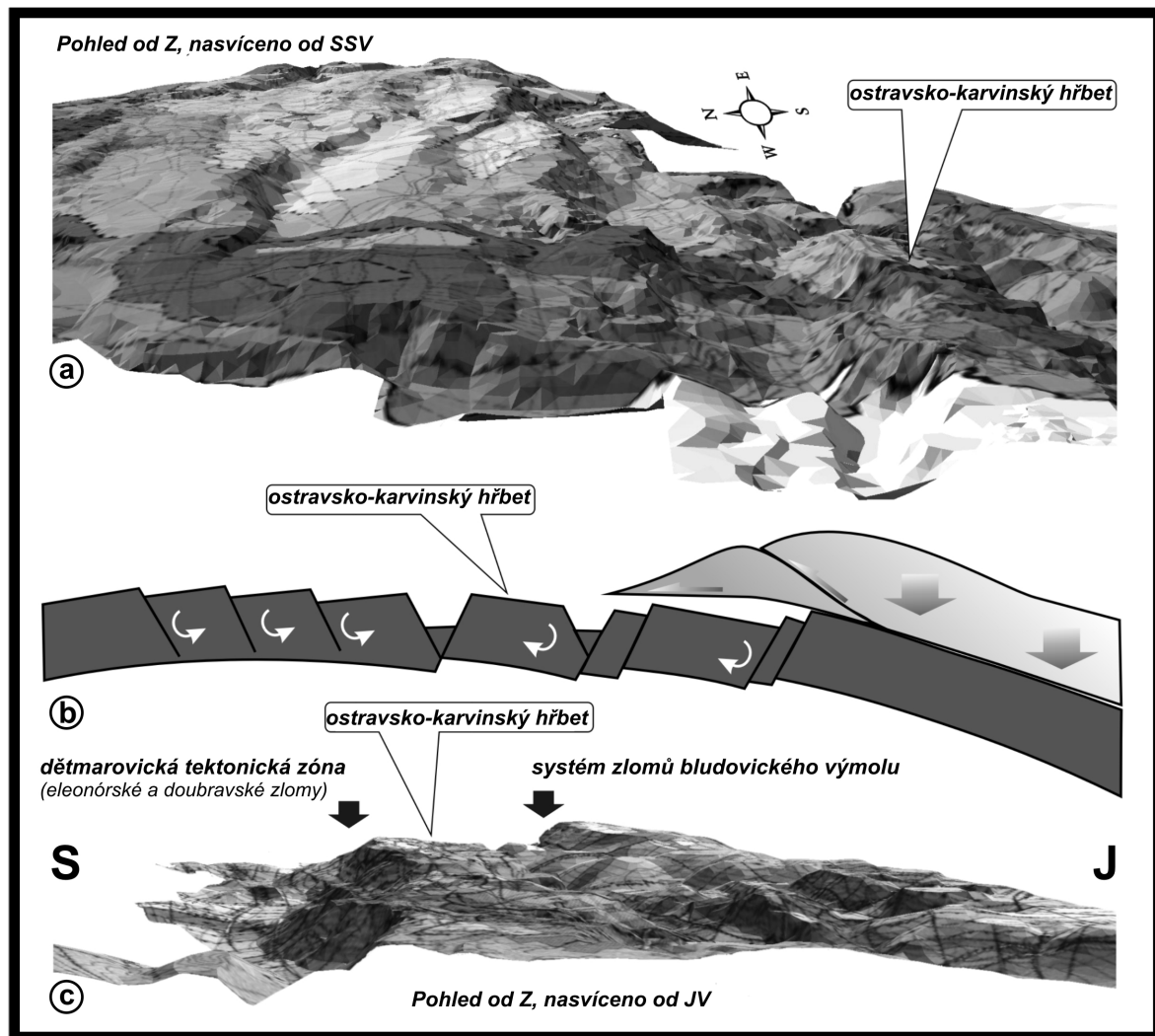


Obr. 3: DMR brunovistulika s interpretovanou sítí hlavních tektonických zón. Široká šedá zóna vyznačuje dělicí labskou tektonickou zónu, která člení brunovistulikum na dvě části s rozdílným morfostrukturálním plánem.

Jihozápadní část krystalinika je především porušena tektonickými zónami sudetského směru, kdežto severovýchodní část systémem západo-východního směru. Některé výrazné tektonické zóny korespondují se zlomy na povrchu. Podle dat Hubatky in Krejčí et al. (1998). Legenda: 1- temenický zlom, 2 - konické zlomy, 3 - zlomy nesvačilského příkopu, 4 - zlomy vranovického příkopu, 5 - zlomy oderských vrchů, 6 - zlomy beskydského stupně, 7 - zlomy jablůnkovského prolomu, 8 - janovický zlom.

Alpínské patro částečně převzalo charakter vnitřního strukturálního plánu kadomského a variského patra. Specifickou geometrii a kinematicko-dynamický vývoj západo-východních zlomových systémů lze vysvětlit výraznou alpínskou rejuvenací těchto prealpínsky založených zlomových systémů v důsledku kolize předpolí alpsko-karpatského tektogenu s nasouvajícími příkrovy Vnějších Karpat (Grygar, Jelínek 2001; Jelínek, Grygar 2002). V důsledku sedimentárního a tektonického zatěžování sedimenty vněkarpatské předhlubně a narůstající topografickou výškou nasouvajících příkrovů Karpat (nakupením - stackingem - příkrovů vněkarpatského akrečního prizmatu) se postupně vytváří prohnutí kontinentální kúry autochtonu - flexura předpolí (obr. 4), která je ve své vnější, strukturálně vyšší a křehčí korové etáži výrazně tahově namáhána. Tato konfigurace paleonapětových polí v prealpínském autochtonu má za následek vývoj antitetických rotačních poklesů. Dochází k reaktivaci především těch existujících zlomových systémů, které jsou v pozici subparalelní s průběhem

pásemného vrásovo-příkrovového orogénu, tedy kolmo na minimální (tahové) napětí. K těmto systémům patří v české části epivariské platformy především systémy dětmarovické tektonické zóny, bludovického a hrabovského zlomu, dále v jižní části hornoslezské pánve např. janovický zlom a především zlomy, které jsou označovány v literatuře jako zlomy beskydského stupně – podbeskydské zlomy (viz Dopita et al. 1997).



Obr. 4: Schéma ohybu litosferické flexury doprovázené rotací (tiltingem) ker alpínského autochtonu a předpoli Vnějších Karpat v důsledku sedimentárního a tektonického zatěžování příkrovy Vnějších Karpat. Legenda: a - DMR epivariského povrchu polské části hornoslezské pánve; b – modelová situace ohybu litosferické flexury; c - DMR české části hornoslezské pánve. Podle Grygara a Jelínka (2002b).

Dokladem těchto mladých deformačních procesů jsou rejuvenované tektonické zóny především západovýchodního směru, původně varisky nebo až kadomsky založené (Kotas 1985; Kumpéra 1989). Zlomy beskydského stupně patří k nejvýznamnějším morfostrukturním prvkům západovýchodního směru epivariské platformy, stejně jako strukturní architektury sv. části brunovistulika. Tyto tektonické zóny se prokopírovaly z paleoreliéfu brunovistulika (obr. 3) nejen do paleoreliéfu paleozoika hornoslezské pánve, ale také do reliéfu alpínského patra. Dokladem toho je zlom směru Hranice - Rožnov. Jeho existenci zobrazuje paleoreliéf brunovistulika stejně dobře, jako reliéf hornoslezské pánve, kde je označován Dopitou et al. (1997) za systém zlomů beskydského stupně. V současném reliéfu DMR Beskyd je velmi dobře zřetelný (obr. 1). Dalším příkladem prokopírování je poruchová zóna brunovistulika, která v paleoreliéfu hornoslezské pánve odpovídá janovickému zlomu (obr. 3). Ve strukturním plánu všech tří pater se vyskytují také okrajové zlomy jablunkovského prolomu.

Významným zlomem západovýchodního směru je okrajový jesenický zlom, který je pokračováním dětmarovické tektonické zóny k západu (obr. 1). Intruze a povrchové výlevy neovulkanitů spolu s výskyty minerálních vod bohatých na CO₂ (z DP Dolů Ostrava, Odra a Heřmanice - Dopita et al. 1997) podél dětmarovické tektonické zóny jsou jedním z dalších dokladů její neoidní geodynamické aktivity. Tato komplexní tektonická zóna s amplitudou vertikálních pohybů (> 1000 m) na dílčích zlomech i hloubkou předbádenské eroze představuje nejmobilnější tektonický systém v rámci celé hornoslezské pánve (Grygar, Jelínek 2002a). Neoidní aktivitu dětmarovické zóny dokládá i pravostranný posun a odpovídající ohyb údolí nivy řeky Odry. Dětmarovická zóna spolu s bludovickou tektonickou zónou, orlovskou strukturou, michálkovickou strukturou, těšínským zlomem, atd. jsou natolik morfologicky výraznými strukturami, že se prokopírovaly i do současného reliéfu.

Alpínská aktivizace prealpínských zlomových struktur epivariské platformy v důsledku sedimentárního a především topografického zatěžování vněkarpatskými příkrovy se však neprojevila pouze v případě zlomů západovýchodního systému. Jak ukazuje morfostrukturní obraz tektonického příkopu Moravské brány a současně strukturní a paleonapěťová analýza v této dílčí oblasti, lemují poklesové dislokace a tenzní příkopy prakticky celou čelní linii vněkarpatských příkrovů. Mají však směr VSV-ZJZ až SV-JZ a jak nasvědčují dostupná data, jde v řadě případů, a v případě Moravské brány zřetelně, o struktury neoidně založené, související s vývojem korové flexury alpínského předpolí (Grygar, Jelínek 2002b).

Diskutované zlomové systémy západovýchodního směru svým vývojem vytvářely typické tektonické rampy (stupně) autochtonu, na nichž docházelo během sunutí, jak staroštýrských, tak především mladoštýrských příkrovů Vnějších Karpat k částečnému zablokování jejich postupu. Tektonické rampy autochtonu následně podmiňují vztyčování vrstev, případně vývoj flexur nad tektonickou rampou typu „fault-propagation fold“ (Davis et al. 1983, Mitra 1990), a především duplexových struktur. Tuto funkci převzaly především zlomy podbeskydského stupně.

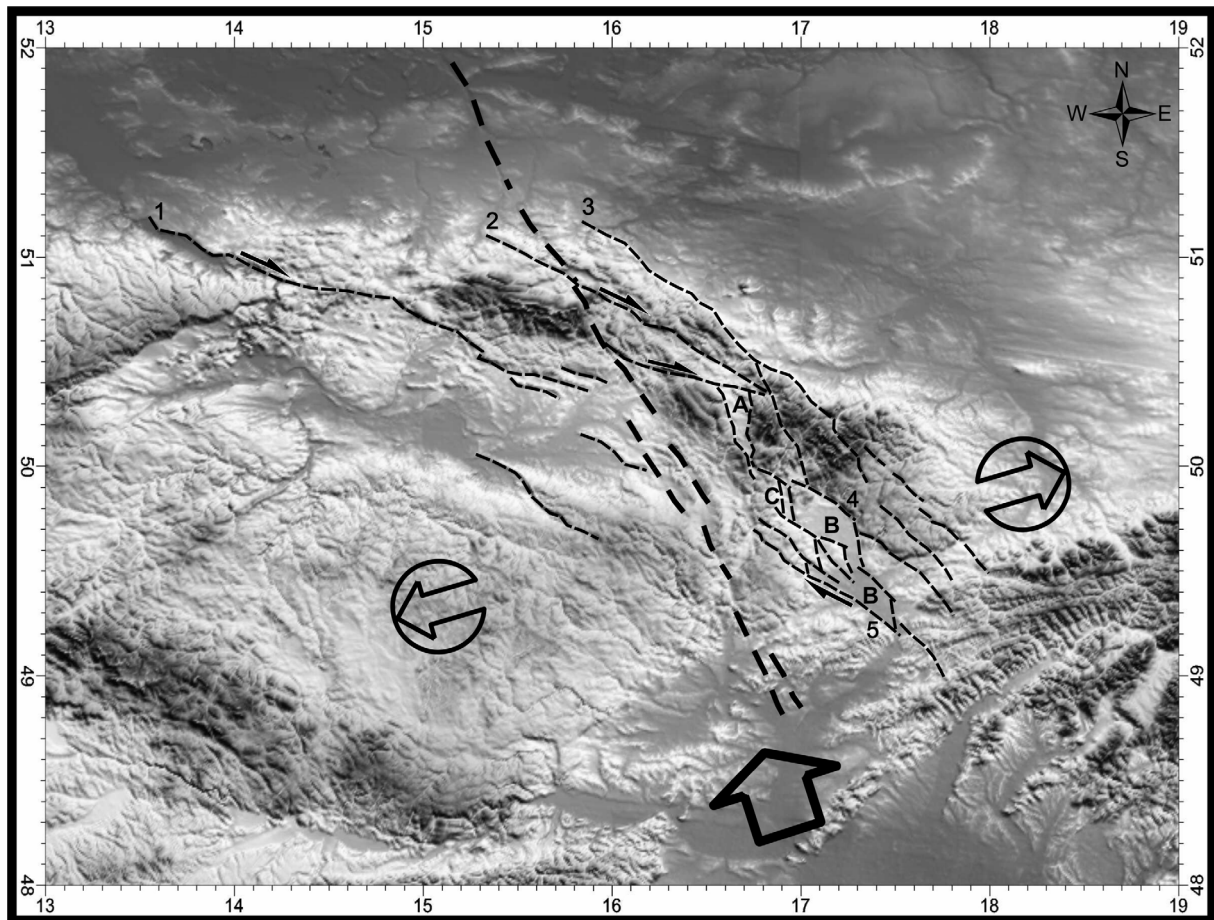
Také radiální zlomové systémy (S-J až SSV-JJZ), původně variského založení (např. těšínský zlom, karvinský příkop) ukazují rysy zřetelné alpínské rejuvenace, projevující se mj. v koincidenci morfostrukturního obrazu pohřbeného a současného reliéfu. Pěkným příkladem oživených tektonických zón orlického směru je zóna jablunkovské deprese, která pozičně přímo navazuje na těšínský zlom. Tento zlom vystupuje jako výrazná dislokační struktura při východním okraji karvinské dílčí pánve a jeho prokopírování do alpínského strukturního patra geneticky podmiňuje vznik nejvýraznější radiální struktury v reliéfu Moravskoslezských Beskyd. Sledujeme-li obraz tohoto zlomového pásma v aktuálním reliéfu sz. vidíme, že přímo navazuje na oderskou tektonickou zónu.

Dominantní zlomovou strukturou sudetského směru, projevující se výrazně i v nejnižší strukturní etáži modelu brunovistulika, je labská tektonická zóna (obr. 3). Na východním okraji ve svrchní kůře Českého masivu podminila její neoidní kinematicko-dynamická aktivita vznik charakteristické romboedrické struktury typu pull-apart pánve (obr. 1), související s existencí dextrální transtenzní kinematiky v labské tektonické zóně. Tato struktura byla označena jako pull-apart pánve Hornomoravského úvalu (Grygar et al. 2002; Grygar, Jelínek 2003). Pokračování labské tektonické zóny jv. pod příkrovy Vnějších Karpat je velmi výrazné také v geofyzikálních mapách, především v geomagnetice a gravimetrii.

Kolizní fáze doprovázená sunutím příkrovů Vnějších Karpat je dobře zjištělá z paleonapěťové analýzy. Alpínské paleonapěťové pole lze charakterizovat globálním kompresním napětím σ_1 orientovaným ve směru SSZ-JJV až SZ-JV (Grygar, Jelínek 2000). Na základě tohoto předpokladu lze stanovit dnešní geodynamický scénář v moravskoslezské oblasti a kinematiku pohybu na hlavních zlomových zónách (obr. 5). Do těchto zón můžeme začlenit temenický, klepáčovský, bušínský zlom, které omezují „pull-apart“ struktury moravskoslezské oblasti (obr. 1). Toto paleonapěťové pole bylo zjištěno i v devonsko-karbonských formacích východního okraje variského akrečního klínu. V bezprostředním předpolí vněkarpatských příkrovů alpínské extenzní paleonapěťové pole odpovídá jak extenzi paralelní s alpínským orogénem (SV-JZ), tak poklesům souvisejícím s vývojem flexury v alpínském autochtonu v důsledku tektonického zatěžování.

Nejstarší křehce-duktilní fáze spojená s kolizí je charakteristická sz.-jv. orientací maximálního (kompresního) pole napětí. Jak ukázala analýza některých vybraných lokalit, dochází v mladších fázích k následné progresivní sinistrální rotaci maximální komprese do směru ZSZ-VJV (asi o 30°). Současně je tato fáze bezprostředně spojena s vývojem traskurentních zlomů, které mají charakter zlomů kompenzujících rozdílnou rychlost násunů příkrovů. V geomorfologickém obraze i strukturním plánu geologických map se vyznačují kulisovitým uspořádáním zlomů kloubového charakteru. Vytváří konjugované dvojice zlomů dvou základních směrů. Směr SZ-JV má vzhledem k elipsoidu regionálního přetvoření dextrální směrnou kinematiku a s ním konjugovaný směr S-J, tak sinistrální smysl posunů. Velmi dobře je tento systém vyvinut především v račanském příkrovu magurské skupiny příkrovů. Přitom systém sz.-jv. dextrálních směrných posunů, případně

kombinovaných zlomů s poklesovou komponentou, koinciduje se sudetským systémem zlomů zděděným z předchozí variské tektogeneze. Jeho frekvence v alpínském autochtonu je však podstatně menší, než ve vněkarpatských alochtonech.



Obr. 5: Digitální model reliéfu střední Evropy s vyznačením základní dynamiky vývoje moravskoslezské oblasti.

Legenda: A - pull-apart příkopu Nýsy, B - pull-apart Hornomoravského úvalu, C - pull-apart Mohelnické brázdy, 1 - lužický zlom, 2 - vnitrosudetský zlom, 3 - okrajový sudetský zlom, 4 - bušínsko-temenická zlomová zóna, 5 - nectavsko-konické zlomy, 6 - železnohorský zlom, modrá linie - orlická zóna křehkého porušení. Podle Grygara a Jelínka (2003).

Závěr

Cílem této studie bylo posouzení morfostrukturního vývoje a vzájemného strukturního ovlivnění variského a alpínského orogénu. Použitá srovnávací morfostrukturní analýza v řadě případů ukázala značnou geometrickou a genetickou korelaci mezi morfostrukturním plánem současného epialpínského reliéfu Vnějších Karpat a strukturním plánem hornoslezské pánve. Výsledky morfostrukturní analýzy dokládají významnou roli alpínské rejuvenace variských zlomových struktur během nasouvání příkrovů alpínského orogénu.

Sedimentární a tektonické zatěžování východního okraje Českého masivu alpínským akrečním klínem ovlivnilo vývoj korové flexury alpínského předpolí a především jeho aktivizaci podél západovýchodních zlomových systémů, subparalelních se směrem zapadokarpatských příkrovů. Zřetelné tektonické naklání korových segmentů (tilting) je typickým příkladem křehké deformace rigidního brunovistulického basementu, kompenzující vývoj asymetrické flexury (obr. 4). Amplituda těchto vertikálních pohybů postupně narůstá od severu, z polské části hornoslezské pánve (s výškovým odsazením řádu desítek až prvních stovek metrů) k jihu, kde na zlomech tzv. beskydského stupně dosahuje řádu prvních kilometrů. Tyto extenzní neoidní deformace lze

dokumentovat i na strukturách nižšího řádu, především v dobývacích polích dolů v jv. části karvinské dílčí pánve.

Zcela zásadní roli ve formování obou orogénů v širší moravskoslezské oblasti sehrálo brunovistulikum. Studium vzájemných vztahů jednotlivých strukturálních etází však nepotvrdilo kadomské stáří nejvýznamnějších tektonických křehkých systémů - západo-východních zlomů a tektonických zón tak, jak to doposud předpokládala většina autorů (Dopita et al. 1997; Kumpera 1983; Kotas 1985 atd). Komplexní analýza všech podkladů naopak podporuje názor, že tyto systémy jsou pozdněvariského založení s velmi významnou neoidní - alpínskou rejuvenací (Grygar, Jelínek 2001; Jelínek, Grygar 2002). Výrazná dynamika paleoreliéfu hornoslezské pánve, značný úklon paleosvahů poruchových zón dokládají neoidní pohyby, související se sedimentárním a tektonickým zatěžováním v důsledku kolize fundamentu předpolí s vněkarpatskými příkrovy. Zatěžování současně evokovalo výraznou extenzi ve vnější svrchně korové etáži brunovistulika, včetně variského strukturálního patra, která podmínila vznik příkopů lemujících na předpolí frontální linii příkrovů.

K nejvýznamnějším morfostrukturálním prvkům západo-východního směru strukturální architektury sv. části brunovistulika, stejně jako epivariské platformy, patří zlomy beskydského stupně a janovický výmol. Tyto tektonické zóny se prokopírovaly z paleoreliéfu brunovistulika nejen do paleoreliéfu paleozoika hornoslezské pánve, ale také do reliéfu alpínského patra.

Významným strukturálním směrem, uplatňujícím se ve strukturálním plánu všech tří strukturálních pater, je radiální zlomová tektonika směru SSZ-JJV a SZ-JV. K nejvýraznějším strukturám tohoto typu patří labská tektonická zóna, která z jz. omezuje hrást kry Pradědu a pokračuje jv. pod příkrovy Vnějších Karpat (obr. 1). Výrazně se projevuje nejen v gravimetrické a geomagnetické mapě, ale také v nejnižší strukturální etáži moravskoslezské oblasti - DMR brunovistulika (obr. 3). Na východním okraji Českého masivu podmínila neoidní kinematická aktivita alpínského tektogénu, související s existencí dextrálních transtenzních paleonapětových polí v labské tektonické zóně, vznik charakteristické romboedrické struktury typu pull-apart pánve (označené jako pull-apart pánev Hornomoravského úvalu, viz Grygar, Jelínek 2003).

Komplexní strukturální analýza karbonských formací východního okraje variského akrečního klínu moravskoslezské oblasti zjistila ve variském tektogenu převládající sz.-jv. orientace maximálních paleonapětí (komprese), odpovídající ve vnější zóně variského akrečního klínu násunům ve směru VJV. V bezprostředním předpolí vněkarpatských příkrovů (alpínský autochton) však byla zjištěna také alpínská extenzní paleonapětová pole odpovídající jak extenzi paralelní s alpínským orogénem (SV-JZ), tak poklesům souvisejícím s vývojem flexury v alpínském autochtonu v důsledku tektonického zatěžování. Z pohledu dynamiky alpínských paleonapětových polí (s převládající orientací maximálního kompresního napětí ve směru SSZ-JJV) se zlomy směru SZ-JV, a zvláště SSZ-JJV dostaly v předpolí vněkarpatských příkrovů do pozice radiálních transtenzních zlomů, konjugovaných se systémy s.-j. až ssv.-jjz. vněkarpatského orogenního oblouku. Vzhledem k tomu je jejich rejuvenace zákonitá. Tato zjištění jsou ve shodě s extenzí směru VSV-ZJZ korespondující s pliocenním a současným kompresním napětovým polem SSV-JJZ v alpsko-karpatském orogénu jak uvádí Decker a Peresson (1996).

Metodický přínos

Vytvořený metodický postup studia morfotektoniky prostřednictvím morfostrukturální analýzy DMR přispěl k obohacení klasické strukturální analýzy. Lze jej aplikovat nejen při zjišťování křehké tektoniky prostřednictvím interpretace DMR, ale také při přesném vytyčení průběhu zlomových ploch v terénu i pod pokryvnými útvary. Morfostrukturální analýzou DMR byla upřesněna pozice některých zlomů sudetského směru (viz zlom klepáčovský, plečský nebo bělský, obr. 1). V literatuře jsou velmi často vykreslovány spojitou přímou linií, která nerespektuje zakřivení reliéfu a sklon zlomu. V některých úsecích nebyl morfostrukturálně jejich průběh jasně určen. V těchto případech je vhodnější vykreslit zlom jako přerušovanou linii (viz bělský zlom). V opačném případě může dojít k chybě, kdy jsou do jedné linie propojeny zlomy, které nemusí mít stejnou strukturálně kinematickou funkci ve vývoji oblasti. Mnohé zlomy vznikly jako R-stříhy a jejich projev v masivu je kulisovitý.

Morfostrukturální analýza DMR může být vhodně využita také jako doplňková technika pro vytváření geologických map. Její výsledky lze použít jak v předběžných fázích průzkumu oblasti, tak i v závěrečné fázi, kdy se vytváří konečná podoba geologické mapy.

Široké uplatnění má tato technika také v aplikované geologii. Příkladem může být inženýrská geologie, kde se velmi často řeší stabilitní poměry horninového masivu a jeho křehké porušení. Navržený metodický postup lze aplikovat ve všech fázích průzkumu, zvláště v kombinaci s geofyzikálním průzkumem.

Poděkování

Studie byla provedena v rámci grantu č. 105/04/0884 s názvem „Analýza strukturně-tektonických poměrů karvinské dílčí pánve (hornoslezská pánev) ve vztahu k vyžitelnosti slojí s postupem těžby do větších hloubek“.

Literatura

- [1] Ahnert F. (1998): Introduction to Geomorphology. *London, Arnold.*
- [2] Aust J., et al. (1997): Odkrytá geologická mapa paleozoika české části hornoslezské pánve 1:100 000. In *Dopita M. et al.: Geologie české části hornoslezské pánve. Praha, Ministerstvo životního prostředí ČR.*
- [3] Bloom A. L. (1998): Geomorphology – A Systematic Analysis of Late Cenozoic Landforms. *New Jersey USA, Prentice Hall Upper Saddle River.*
- [4] Buday T., Kodým O., Mahel' M., Máška M., Matějka A., Svoboda J., Zoubek V. (1961): Tektonický vývoj Československa. *Praha, ÚÚG.*
- [5] Buday T., Ďurica D., Opletal M., Šebesta J. (1997): Význam bělského a klepáčovského zlomového systému a jeho pokračování do Karpat. *URGP, 9, 275-281.*
- [6] Davis D., Suppe J., Dahlen F.A. (1983): Mechanics of Fold and Thrust Belts and Accretionary Wedges. *Jour. Geophys. Res., 88, B2, 1153-1173.*
- [7] Decker K., Peresson H. (1996): Tertiary kinematics in the Alpine-Carpathian-Pannonian system: links between thrusting, transform faulting and crustal extension. In *Oil and Gas, Viena, OMV.*
- [8] Dopita M. et al. (1997): Geologie české části hornoslezské pánve. *Praha, Ministerstvo životního prostředí ČR.*
- [9] Dvořák J. (1982): The Devonian and Lower Carboniferous in the basement of the Carpathians South and Southeast of Ostrava (Upper Silesian Coal Basin, Moravia, Czechoslovakia). *Z. Dtsch. Geol. Ges., 133, Hannover, 551-570.*
- [10] Grygar R. (2001): Strukturní vývoj hornoslezské pánve. In *Müller P. et al.: Komplexní zhodnocení programu CBM. MS ČGS, MS Geofond ČR.*
- [11] Grygar R., Gnojek I., Hubatka F., Jelínek J. (2002): Brunovistulian Terrane – Synthesis of Morphostructural Analysis and Geophysical Data (Moravo-Silesian Area, Czech Republic). *Geolines, 14, 7th Meet. Czech Tectonic Group Želazno, Poland, May 9-12, 26 - 27.*
- [12] Grygar R., Jelínek J. (2000): Alpine and Variscan Orogeny Belts Interaction - an Example of Morphostructural Analysis (Moravosilesian Region of the Bohemian Massif). *Geolines, 10, Institute of Geology, Academy of Sciences of the Czech Republic, April 2000, 23-24.*
- [13] Grygar R., Jelínek J. (2001): Alpine rejuvenation of Epi-Hercynian foreland – the complex morphostructural and tectonic analysis (Moravosilesian region, Bohemian massif). *Geolines, 13, 6th Meet. Czech Tectonic Group Donovaly – Nízké Tatry, May 3-6, 60-61.*
- [14] Grygar R., Jelínek J. (2002a): Interaction Between Alpine and Variscan Orogeny on the Basis of Study Digital Elevation Models – Moravosilesian Area. *Acta Montana IRSM AS CR, Series A No. 20 (124), 51-55.*
- [15] Grygar R., Jelínek J. (2002b): Závěrečná zpráva grantového úkolu GAČR 205/001182 s názvem - Strukturní a morfostrukturní vztahy a vzájemné tektonické ovlivnění variského a alpínského orogénu - moravskoslezská oblast Českého masivu. *Praha, MS Geofond.*
- [16] Grygar R., Jelínek J. (2003): Upper Morava and Nysa Pull-apart Grabens: Implication for Neotectonic Dextral Transtension on Sudetic Faults System. *Geolines, 16, 8th Meet. Czech Tectonic Group Hrubá Skála, April 24-27, 35-36.*
- [17] Grygar R., Vavro M. (1995): Evolution of Lugosilesian Orocline (North-eastern periphery of the bohemian Massif): Kinematics of Variscian deformation. *Journal of the Czech Geological Society, 40, 1-2, 65-90.*

- [18] Jelínek J., Grygar R. (2002): Interaction Between Alpine and Variscan Orogeny on the Basis of Study Digital Elevation Models – Moravosilesian Area. *Acta Montana, Praha, IRSM AS CR, 20 (124), 51-55.*
- [19] Jelínek J. (2003): Morfotektonická analýza vzájemného strukturního ovlivnění na styku variského a alpínského orogénu – moravskoslezská oblast. *Doktorská disertační práce, VŠB-TU Ostrava, 198.*
- [20] Jura J. (1995): The Young-Alpine Morphotectonics of the Silesian Coal Basin. *Tech. Posz. Geol., 3, 13-21.*
- [21] Kotas A. (1985): Structural Evolution of the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *X. Congr. Int. Strat. Coal Carb., Madrid 1983, C.R.3, 459-469.*
- [22] Krejčí O., Muller P., Franců J. (1998): Neodynamic model of the contact of the Bohemian massif and Western Carpathians. In *Hubatka F., Sedlák J., Ondra P.: Geofyzikální práce na úkolu VaV/630/1/97, Brno, Czech Geol. Surv.*
- [23] Krcho J. (1990): Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu. *Bratislava, Vyd. Slov.Aka. Vied.*
- [24] Kumpera O. (1983): Geologie spodního karbonu jesenického bloku. *Praha, Úst. Úst. geol. Academie.*
- [25] Kumpera O. (1989): Geologický a strukturní vývoj hornoslezské pánve. *Sbor. věd. prací Vys. Šk. báň., horn.-geol., 35, Ostrava, 1-36.*
- [26] Menčík E. et al. (1983): Geologie Moravskoslezských Beskyd a podbeskydské pahorkatiny. *Praha, Ústř. úst. geol., Academia.*
- [27] Misař Z., Dudek A., Havlena V., Weiss J. (1983): Geologie ČSSR I, Český masiv. *Praha, Státní pedagogické nakladatelství.*
- [28] Mitra S. (1990): Fault-propagation folds: Geometry, kinematics evolution, and hydrocarbon traps. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 74, 921-945.*
- [29] Neubauer F., Cloetingh S., Dinu C., Mocanu V. (1997): Tectonics of the Alpine-Carpathian-Pannonian region: Introduction. *Tectonophysics 272, 93-96.*
- [30] Petit J. P. (1987): Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *J. Struc. Geol., 9 (5/6), 597-608.*
- [31] Petránek J. (1954): K vzniku vymýtin v ostravsko-karvinském revíru. *Věstník ÚÚG 29, 109-112.*
- [32] Potfaj M. (1998): Geodynamic development of Klippen Belt and Flysch Belt. In *Rakús M.: Geodynamic development of the Western Carpathians. Bratislava, Geological Survey of Slovak Republic, 143-154.*
- [33] Rakús M. (1998): Geodynamic development of the Western Carpathians. *Bratislava, Geological Survey of Slovak Republic.*
- [34] Ritter D. F., Kochel R. C., Miller J. R. (2002): Process geomorphology - fourth edition. *New York, The McGraw-Hill Companies.*
- [35] Staněk F. (1999): Srovnání některých metod při modelování vnitřních atributů ložiska uhlí. *Documenta Geonica 1999, Ostrava, 163-173.*
- [36] Weibel R., Heller M. (1991): Digital terrain modeling. In *Maguire D.J.: Geographical Information Systems: Principles and Applications, England, Longman Scientific and Technical.*
- [37] Yoeli P. (1977): Computer-executed interpolation of contours into arrays of randomly distributed height-points. *Cartographic Journal, 14(2), 103-108.*

Summary

The Moravosilesian zone of the Bohemian Massif is appropriate area, where principles of morphotectonic analysis can be applied for solving specific problems of structural-tectonic conditions and deformation development. The area is a unique case due to superposition of three structural levels, corresponding to three orogeny cycles. The Cadomian orogeny is represented by Brunovistulian terrain, the Variscan orogeny by Rheno-Hercynian foredeep and Subvariscan foreland and the Alpine orogeny by the West Carpathian foredeep and the Outer West Carpathian nappes. Brunovistulicum as the oldest crustal segment represents a

foreland of both accretionary wedges: the older Variscan one with generally top-to-NE kinematics and younger Alpine wedge with top-to-NW up to N thrusting.

Comparative morphostructural analyses reveal significant and so far not well quantified role of the Alpine rejuvenation of the Variscan fault structures (especially of subequatorial faults and shear zones) in the course of nappe thrusting during the period of Alpine orogeny. There is causal genetical interference with tectonic role of pre-Alpine Brunovistulian autochthon, by which dynamic and kinematic development of the Outer Carpathians nappes, especially of their internal structure framework was induced. On the contrary the above-mentioned pre-Alpine basement was simultaneously modified as a consequence both of tectonic loading by Alpine nappes and of sedimentary loading by foredeep filling. This loading influenced development of a lithospheric flexure of the Alpine foreland (Fig. 4) and mainly its activation – rifting by subequatorial fault systems. Distinct tilting (bookshelf tectonic) is a typical brittle deformation style of rigid Brunovistulian basement that is a consequence of brittle crust flexuring.

Distinct features (second trend) of Alpine rejuvenation are indicated equally by radial originally Variscan based faults, among them for instance the Těšín fault, Orlová fault-propagation-fold structure can be ranged as well as Karviná graben which is distinctly copied into Alpine structural level.

By up-to-date in situ stress measurements in the contact zone both of Variscan and Alpine orogeny the consideration of continued, Alpine tectogenesis paleostress field is supported, which is characterized by the nearly same position of main global compression stress σ_1 being oriented NNW-SSE up to NW-SE. At this prerequisite we can estimate a recent geodynamic scenario in the Moravosilesian area and kinematics on the main faults and tectonic zones (Fig. 5). Neo-Alpine stage of stretching (ENE-wards) of Alpine foreland corresponds with apparent opening of the Upper Moravia depression. Its pull-apart basin pattern is evident and it is controlled by geodynamic activity and dextral strike-slip kinematics on both Bušín fault and Haná tectonic zone (Fig. 1).

Recenzenti: Doc. Ing. Gejza Timčák, CSc., Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológie TU Košice,
RNDr. Rostislav Melichar, Dr., Přírodovědecká fakulta MU v Brně.