



**Geologické výzkumné práce v části VÚ Boletice  
k vymezení potenciálně vhodného území  
pro umístění hlubinného úložiště**

# **TEKTONICKÁ ANALÝZA A INTERPRETACE DRUŽICOVÝCH SNÍMKŮ**

Dílčí zpráva

Autorský kolektiv: Veronika Kopačková, Kryštof Verner, Jan Franěk,  
Karel Martínek, Lukáš Vondrovic, Jiří Šebesta

Praha, červen 2010

## **Abstrakt**

V rámci předložené závěrečné zprávy jsou shrnuty výsledky analýzy distančních dat DPZ a terénního strukturního výzkumu (prvků křehké a duktilní tektoniky) na lokalitě VÚ Boletice. Výzkumné práce byly provedeny Českou geologickou službou v období 10/2009 až 04/2010 pro zadavatele AQUATEST a.s., a to v součinnosti s řešením projektu SÚRAO „Geologické výzkumné práce v části VÚ Boletice k vymezení potenciálně vhodného území pro umístění hlubinného úložiště“.

V případě analýzy distančních dat byla z důvodu výrazné zakrytosti zájmového území kromě optických družicových (LANDSAT) a leteckých stereoskopických snímků použita také radarová družicová data (ALOS PALSAR) a digitální model reliéfu. Analýza distančních dat byla provedena za účelem identifikace a klasifikace indicií tektonického porušení horninového prostředí.

Identifikované tektonické indicie byly validovány s výsledky: (i) Terénního strukturního výzkumu. Strukturní analýza (identifikace orientace, charakteru a superpozice duktilních a křehkých struktur) proběhla v rámci širšího polygonu zájmového území, celkově byla zpracována data z více než 450 výchozových lokalit, (ii) Letecké geofyziky (MILIGAL 2009) a (iii) dostupných archivních dat (např. geologické mapy měřítek 1:500 000, 1:200 000, 1:50 000).

Validované indicie křehké tektoniky byly klasifikovány do definovaných kategorií 2.-5. (Woller 2009). Klasifikované výstupy byly unikátním datovým zdrojem pro tvorbu vrstvy „tektonika“ v rámci multikriteriální analýzy k vymezení území potenciálně vhodné lokality pro umístění budoucího hlubinného úložiště.

Intenzita a charakter tektonického porušení hornin patří mezi klíčové faktory mající vliv na stabilitu hlubinného úložiště. Na základě validace distančních a strukturních dat je k danému účelu doporučeno jako nejvhodnější území v severní části zúženého zájmového polygonu.

## Abstract

Morpho-tectonic Interpretation of diverse Remote Sensing (RS) data and results coming from detailed geological field investigations (e.g., brittle and ductile tectonics) are summarized in the present study. The described research was carried out in the framework of a project „Geological investigation in parts of Boletice military area to determine potential areas suitable for siting a deep geological repository“, that was funded by RAWRA (Radioactive Waste Repository Authority) and lead by AQUATEST a.s..

The study area was cover by dense vegetation therefore ALOS PALSAR data were used as well as satellite optical data (LANDSAT), analogue aerial stereoscopic photos and digital elevation model (DEM). Analysis and interpretation of these data allowed us to identify and further classify tectonic indications of rock deformation.

The tectonic indications identified in the remote sensing data were validated with results coming from: (i) geological field investigations: structural analysis and identification of orientation, character and superposition of ductile and brittle structures were carried out in the area of a wider polygon and measurements from more than 450 outcrops were processed and interpreted. (ii) Aerial geophysics (MILIGAL 2009) and (iii) all the geological maps available for the study area (geological maps at the scales of 1:500.000, 1:200.000, 1:50.000).

The validated indications of brittle tectonics were classified into categories (2-5) defined by Woller (2009). These classified structures became unique basis for multi-criteria analysis leading to a determination of potential areas suitable for siting a deep repository.

Intensity and character of rock deformation is a key factor that significantly influences stability of the deep repository. Based on the result presented in this study we recommend the northern part of the selected area (the smaller polygon) for further investigation.

Projekt: Geologické výzkumné práce v části VÚ Boletice k vymezení  
potenciálně vhodného území pro umístění hlubinného úložiště

Závěrečná zpráva, autorský kolektiv ČGS

---

Obsah:

<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>5</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK POUŽITÝCH V TEXTU</b>	<b>5</b>
<b>DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ</b>	<b>6</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>7</b>
<b>1. GEOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA LOKALITY BOLETICE</b>	<b>7</b>
<b>2. REGIONÁLNÍ SOUVISLOSTI</b>	<b>8</b>
<b>3. METODIKA</b>	<b>10</b>
3.1 ZPRACOVÁNÍ DAT DPZ	10
3.1.1 Popis použitých distančních dat	10
3.1.2 Popis dalších datových vrstev použitých pro analýzu a interpretaci	12
3.1.3 Metodika zpracování	13
3.2 TERÉNNÍ PRŮZKUM	18
3.2.1. Popis terénních prací a charakteristika dat	18
<b>4. INTERPRETACE A VÝSLEDKY</b>	<b>19</b>
4.1 MORFOTEKTONICKÁ ANALÝZA	19
4.1.1 Exogenní dynamika postavená na podkladě leteckých snímků	19
4.1.3 Strukturně tektonická analýza na podkladě distančních snímků	22
4.2 VÝSLEDKY VYPLÝVAJÍCÍ Z TERÉNNÍHO PRŮZKUMU	23
4.2.1 Popis získaných dat	23
4.2.2 Strukturní interpretace	30
<b>5 SYNTÉZA</b>	<b>31</b>
5.1 SYNTÉZA VÝSLEDKŮ DISTANČNÍCH DAT (DRUŽICOVÉ SNÍMKY, LETECKÉ SNÍMKY A LETECKÁ GEOFYZIKA)	31
5.2 VALIDACE DISTANČNÍCH METOD S VÝSLEDKY TERÉNNÍ STRUKTURNÍ ANALÝZY	33
5.3 PŘÍNOS JEDNOTLIVÝCH APLIKOVANÝCH METOD PRO TVORBU DATOVÉ VRSTVY „TEKTONIKA“ MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZY	42
<b>6 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ</b>	<b>44</b>
<b>LITERATURA</b>	<b>46</b>

## Seznam příloh

### Mapové přílohy

Příloha M1 Syntetická mapa tektonických indicií

### Datové přílohy

Data\_D1 Dokumentační deník  
Data\_D2 Tektonické indicie kategorie 2  
Data\_D3 Tektonické indicie kategorie 3  
Data\_D4 Tektonické indicie kategorie 4  
Data\_D5 Tektonické indicie kategorie 5  
Data\_D6 Exogenní morfologické formy

## Seznam zkratk použitých v textu

Zkratka	Vysvětlení
ArcGIS	Program pro práci s geograficky definovanými objekty od firmy ESRI
CD	Datový nosič
ČGS	Česká geologická služba
DMR	Digitální model reliéfu
DMU25	Digitální model území 1:25 000
DN	Digitální hodnota pixelu („Digital Number“)
DPZ	Dálkový průzkum Země
GEOČR50	Vektorová sada geologických bežešvých map
HÚ	Hlubinné uložště
Kbar	Kilobar
M	Magmatická planární stavba
RGB	Pásma viditelné části elektromagnetického spektra (R – červené, G – zelené, B – modré)
S	Metamorfní planární stavba
S-JTSK	Souřadnicový systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
SRTM	Gridový výškový model (90 m) radarové interferometrie (USGS)
SURAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
Tab.	Tabulka
VGHUR	Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad

## Definice základních pojmů

Foliace - duktilní planární struktura definovaná kombinací tvarové přednostní orientace jednotlivých minerálních zrn horniny a kompozičního páskování

Lineace - duktilní lineární struktura definovaná tvarovou přednostní orientací jednotlivých minerálních zrn horniny nebo jejich agregátů

Lineární strukturní indicie – interpretovaný lineární strukturní prvek, který má projevy ve více typech distančních dat (radar, DMR) a/nebo je dokladovaný také terénními strukturními měřeními; nejčastěji se jedná o zlomy a puklinové systémy

Pólový diagram – projekce planárních struktur na spodní polokouli, kde je každá plocha reprezentována jediným bodem. Tento bod představuje projekci normálového vektoru dané plochy

Puklina (extenzní) - křehká diskretní planární struktura obvykle lokálního měřítka, která porušuje horninu bez vzájemného posunu bloků oddělených puklinou

Puklina (střížná) - křehká diskretní planární struktura obvykle lokálního měřítka, podél které došlo ke vzájemnému posunu bloků oddělených puklinou o méně než 1m

Zlom – křehká diskretní planární struktura různého měřítka, podél které došlo ke vzájemnému posunu bloků oddělených zlomem o více než 1m

Střížná zóna – křehce - duktilní planární struktura definovaná mediální plochou, podél které došlo ke vzájemnému posunu bloků oddělených střížnou zónou, a ohybem okolní foliace v důsledku pohybu během křehce-duktilního chování horniny

Striace – křehká lineární struktura, soubor rýh vytvořených během pohybu podél zlomu nebo střížné pukliny

Území širšího zájmu – obdélník (448 km<sup>2</sup>)

Vymezené území – polygon definovaný SURAO (81 km<sup>2</sup>)

## Úvod

V rámci této závěrečné zprávy jsou shrnuty výsledky terénního strukturního výzkumu prvků duktilní a křehké tektoniky a analýzy distančních dat DPZ na lokalitě VÚ Boletice, které byly provedeny Českou geologickou službou v období 10/2009 až 04/2010 pro zadavatele AQUATEST a.s. Výzkum probíhal v součinnosti s řešením projektu SÚRAO „Geologické výzkumné práce v části VÚ Boletice k vymezení potenciálně vhodného území pro umístění hlubinného úložiště“.

Z důvodu výrazné zakrytosti zájmového území vegetačním pokryvem byla kromě optických družicových a leteckých dat použita také radarová družicová data a digitální model reliéfu. Analýza distančních dat DPZ proběhla za účelem identifikace a klasifikace možných indicií tektonických nehomogenit horninového prostředí. Právě míra a charakter tektonického porušení hornin patří mezi klíčové faktory mající vliv na stabilitu hlubinného úložiště.

Práce probíhaly v souladu se zpracováním obdobné problematiky na dalších hypotetických lokalitách hlubinného úložiště (Pospíšil et al. 2004, Woller 2006, Bárta et al. 2004). Metodika výzkumu byla mírně modifikována a to vzhledem k předpokládaným specifikám geologické stavby na lokalitě VÚ Boletice. Nadstandardní byla zejména integrace distančních dat DPZ a geofyzikálního průzkumu s rozsáhlým souborem terénních strukturních dat. Právě z důvodu zmíněné integrace se značně zvýšila relevance výsledných interpretací.

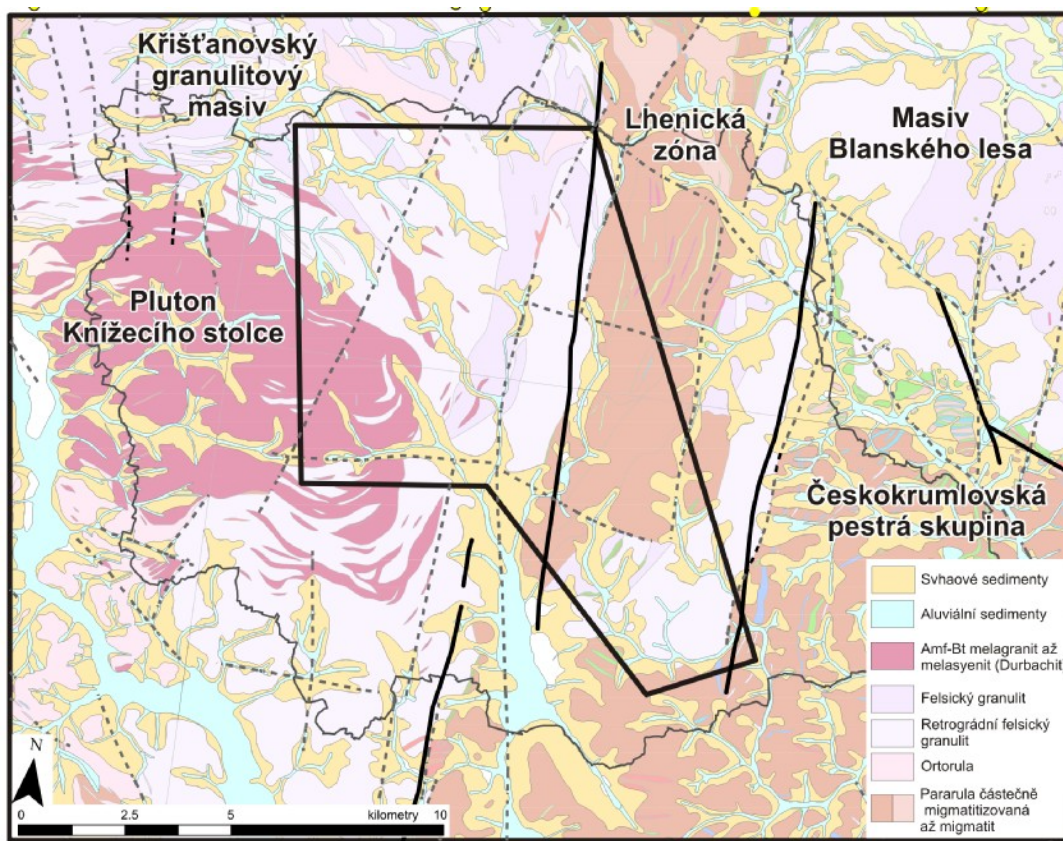
### 1. Geologická charakteristika lokality Boletice

Do zájmové oblasti definovaného širšího polygonu v rámci lokality VÚ Boletice zasahují čtyři hlavní geologické formace (**obr. 1**): (i) Horniny granulitového masívu Blanského lesa o celkové rozloze ~278 km<sup>2</sup> se nachází v jeho východní části; (ii) Severní, jižní a středové části zájmové oblasti jsou tvořeny horninami Křišťanovského granulitového masívu (KGM) o celkové rozloze ~154 km<sup>2</sup>. (iii) Pluton Knížecího stolce (amfibol-biotitický melagranit až melasyenit) zaujímá v erozním řezu plochu ~52 km<sup>2</sup> s výskytem v západní části polygonu. (iv) Zbývající území (~72 km<sup>2</sup>) pak zaujímají pararuly a migmatity moldanubika (monotónní skupiny zastoupené ve Lhenickém prolomu v úzkém S-J pruhu na severovýchodě území a Českokrumlovské pestré skupiny na jihovýchodě širšího polygonu).

Geologická prozkoumanost zájmové oblasti je relativně malá a nerovnoměrná. První systematický geologický průzkum byl proveden v padesátých letech v rámci projektu vyhledávání uranových ložisek (geologické mapy širšího území v měřítku 1:50 000; archiv Diamo a. s.). Geologickými výzkumy v širším okolí se dále zabývali Čech et al. (1962) a Kodým (1963) v rámci projektu sestavování geologických map v měřítku 1: 200 000. Nové geologické mapování a základní geologický průzkum oblasti (v měřítku 1:25 000 a 1: 50 000) byl proveden Jakešem, Frejvaldem a Kodým. Zmíněné výstupy pak posloužily k tvorbě základních geologických map v měřítku 1:50 000 (Kodým et al. (1985), Kodým et al. (1990), Pelc et al. (1996) a Miksa et al. (1996). V rámci nového geologického mapování České geologické služby (Pertoldová et al. 2006) bylo detailně zpracováno území v jz. části VÚ (Želnavá - kóta Hrad, Bulov a Černý les).

V rámci vymezeného území dále v minulosti probíhal specializovaný geologický, petrologický a geofyzikální výzkum. Petrostrukturním vývojem a genezí jihočeských granulitů a okolních metamorfovaných hornin moldanubika se v poslední době zabývali Jakeš

(1969), Kodým et al. (1972), Rajlich et al. (1986), Vrána (1989), Lobkowicz et al. (1996), Vrána a Šrámek (1999), Kröner et al. (2000), Svojtka et al. (2002), Janoušek et al. (2004), Verner et al. (2004), Franěk et al. (2006) a Verner et al. (2008). Práce věnované petrologii, geochemii a strukturnímu záznamu granitových hornin v širší oblasti publikovali: Kurat (1965), Finger (1986), Finger et al. (1997), Breiter a Scharbert (1998), Gerdes et al. (2000), Matějka et al. (2003), Pertoldová et al. (2004), Breiter a Pertoldová (2004), Verner a Pertoldová (2004), Verner et al. (2005), Verner et al. (2008) a Verner et al. (2009). Poznatky o strukturním a metamorfním vývoji moldanubika širší oblasti jsou uvedeny např. v pracích Vrány (1992). Geologii, petrologii, mineralogii a ložiskům nerostných surovin Šumavy se věnuje kniha Průvodce geologií Šumavy vydaná v roce 2006 (Babůrek et al. 2006). Geomorfologií širšího okolí studované oblasti v kontextu západních a jižních Čech a související post-variskou tektonickou aktivitou se zabývali např. Kopecký (1973), Kopecký (1989), Kopecký (1983), Stehlík a Balatka et al. (1965), Balatka et al. (1991).



Obr. 1 Zjednodušená geologická mapa studované oblasti: zájmového území VÚ Boletce (jeho obrys vyznačen světle šedě, dále je vyznačeno území širšího zájmu (větší, černě ohraničený obdélník) a vymezené území (menší, černě ohraničený nepravidelný polygon).

## 2. Regionální souvislosti

V širším rámci zájmové oblasti - jihozápadní části moldanubika vycházejí na povrch spodně až středně korové horniny (Urban and Synek 1995), které zaznamenaly polyfázové tektonometamorfni procesy (např. Franěk et al 2006, Verner et al. 2008). Zjednodušeně řečeno, během Variské orogeneze okolo 340 Ma dochází k vysokotlaké-vysokoteplotní metamorfóze spodně-korových hornin (granulitů, eklogitů), následuje jejich velmi rychlá exhumace do podmínek střední kůry spojená s retrográdní metamorfózou za vysokých teplot a



nízkých tlaků, rozsáhlou anatexí, superpozicemi dílčích orogenních staveb a synchronním výstupem ultradraselných a hybridních magmat (například pluton Knížecího Stolce). Časově tento významný event spadá do období 339-335 Ma pro centrální části Moldanubika a 326-320 Ma pro jeho bavorskou část (Kalt et al. 2000). Dále, v čase doznívající vysokoteplotní nízkotlaké metamorfózy, okolo 330 Ma, začíná aktivita lokalizovaných deformačních zón SSV-JJZ a ZSZ-VJV směrů. Jedná se například o Pfahlskou střížnou zónu oddělující Šumavskou a Bavorskou část moldanubika (např. Brandmayr et al. 1995). V součinnosti s těmito událostmi dochází k vmístění a krystalizaci velkých objemů I-S typů granitových magmat Moldanubického plutonického komplexu, jehož západní části výrazně zasahují právě do zájmové oblasti Šumavského moldanubika (Verner et al. 2009).

Iniciální křehké a křehce-duktilní struktury (zlomy a střížné zóny) původně mladovariského stáří byly v mladších obdobích často reaktivovány. V jižní části Českého masívu v dominantní míře vystupují strmé zlomové struktury sz.-jv. průběhu (tzv. bavorského směru), které mají převažující pravostrannou kinematiku a jsou subparalelní s orientací dunajské a pfahlské střížné zóny, v širším měřítku také s labskou zlomovou zónou a sudetskými zlomy. Tato deformace má v oblasti střední Evropy výrazné projevy v recentní morfologii. Další významné zlomové zóny regionálního měřítko mají SSV-JJZ průběh. Jedná se pravděpodobně o konjugovaný systém k výše popsanému sz.-jv. směru (např. blanická, jihlavská a boskovická brázda, dále méně významná lhenická zlomová zóna protínající s.-j. směrem zájmové území). Datování aktivity iniciálních křehkých i duktilních střížných zón (dunajské, pfahlské a rodelské) ukazuje na stáří cca 280 – 300 Ma (např. Brandmayr et al. 1995). Pozdně variské křehké struktury (zlomové a střížné zóny) byly v mladších obdobích (mesozoika a terciér) často reaktivovány a v mnoha případech si zachovaly stejnou nebo podobnou kinematiku pohybu.

V nejmladších obdobích pokračuje křehká deformace hornin v režimu převážně sz.- a ssz. orientovaného kompresního napěťového pole (Müller et al., 1997; Jarosinski, 2006). Tato aktivita se projevuje slabou seismickou aktivitou a to zejména v západních oblastech Českého masívu (oblast oháreckého riftu), na severu (oblast Západních Sudet) a podél východního okraje Českého masívu. Zájmové území VÚ Boletice patří v rámci České Republiky mezi seismicky klidné oblasti. Mapa recentních korových vertikálních pohybů (Vyskočil-Kopecký 1974) sestavená na základě opakovaných nivelačních měření (v období 1873-1970) ukazuje na vertikální pohyby v řádu mm/rok. Zájmové území VÚ Boletice spadá dle této klasifikace do zóny 0 – 0,5 mm/rok, tedy do oblasti se slabou recentní aktivitou, v podstatě v rámci chyby měření.

Neotektonické studie Českého masívu ze 70. a 80. let ukazují relativně rychlý výzdvih oblasti Šumavy v období oligocén-kvartér. Uvnitř vyzdvihované části Šumavy (zvláště v zájmovém území) však k žádným významným změnám nedocházelo (Kopecký 1973). Výjimku tvoří lhenická zlomová zóna na které je předpokládána slabá neotektonická aktivita (např. Kopecký 1983). Ani podrobnější morfotektonické mapování (Balatka et al. 1991) neukazuje žádné další indicie recentní tektonické aktivity (Kopecký 1973, Kopecký 1989, Kopecký 1983, Stehlík a Balatka et al. 1965, Balatka et al. 1991). V mapě Kopeckého (1989) je interpretován jeden neotektonický zlom průběhu SZ-JV, který ohraničuje ze severu pluton Knížecího stolce. V textovém doprovodu však chybí příslušný textový komentář a tak se pravděpodobně jedná o litologicky predisponovaný erozní jev. Mezi tyto prvky dále patří svahy vrcholových partií plutonu Knížecího stolce interpretované v přehledné geomorfologické mapě (Stehlík a Balatka et al. (1965). Ani podrobnější morfotektonické mapování (Balatka et al. 1991) neukazuje indicie mladého porušení hornin mimo oblasti lhenické zlomové zóny. Pro

dlouhodobou stabilitu a relativně pomalý výzdvih mesozoicko-paleogenního peneplénu svědčí také hojný výskyt rovnoměrně distribuovaných fosilních zvětralin (Kopecký 1983). Členitost současného reliéfu tedy pravděpodobně souvisí s neotektonickými pohyby, ovšem s malými rychlostmi výzdvihu a eroze dosahující maximálních rychlostí 1000 m za posledních 25-35 mil. let.

### 3. Metodika

#### 3.1 Zpracování dat DPZ

##### 3.1.1 Popis použitých distančních dat

Data DPZ (viz níže) sloužila k interpretaci VÚ Boletice a jeho širokého okolí, výstupy byly finálně zpřesněny do měřítka 1:10 000 pro vymezené území. Interpretace vycházející z analýzy distančních dat byly korelovány s terénními daty získanými v rámci mapovacích a výzkumných projektů řešených dlouhodobě Českou geologickou službou (ČGS).

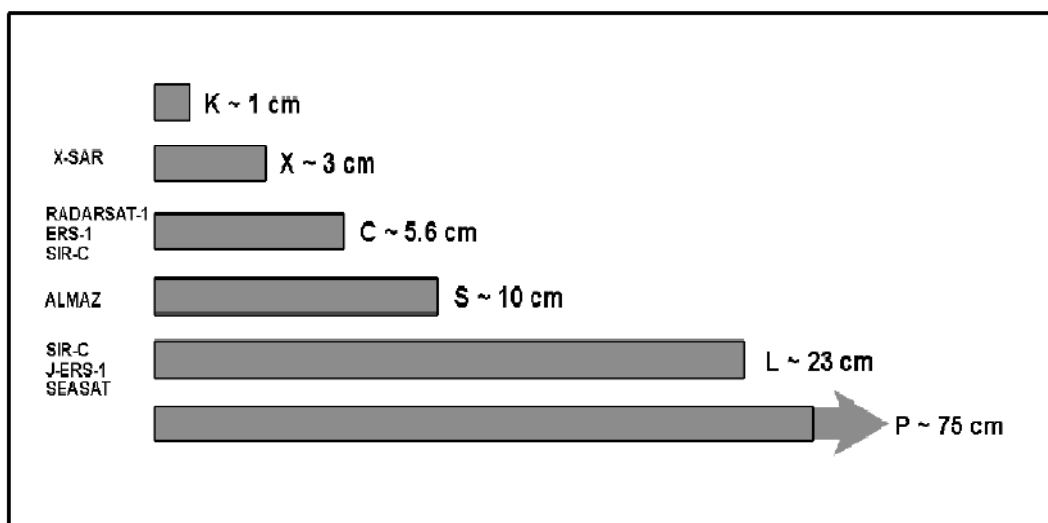
Vzhledem k hustému vegetačnímu pokryvu studované lokality Boletice byla využita následující data:

- Radarová data japonské družice ALOS PALSAR s dostatečně dlouhou vlnovou délkou (L pás)
- DMR (bylo pracováno s nejpodrobnějšími dostupnými výškovými modely v ČR ZABAGED10 a DMU25, pro vyhodnocení širokého okolního regionu byla využita výšková data SRTM)
- Referenčně byla využita i optická data Landsat 7 ETM<sup>+</sup>
- Vedle výše uvedených družicových satelitních dat byly dále použity analogové letecké stereoskopické snímky z archívu VGHUR (Dobruška, 1983), následně bylo provedeno jejich stereoskopické vyhodnocení a vizuální morfotektonická interpretace pro vymezené území.

Družicová a distanční data sloužila k interpretaci celého území širšího zájmu a jeho okolí, letecké stereoskopické snímky sloužily k interpretaci vymezeného území (**obr. 1**).

##### Stručná charakteristika použitých satelitních dat

Dielektrické vlastnosti, které odrážejí především rozdíl mezi vodou, půdou a obsahem vody v půdě, lze nejlépe zachytit v mikrovlnné části elektromagnetického spektra, tedy v té části spektra, kde jsou pořizována *radarová data*. Obecně se dá říci, že čím delší je vlnová délka (a menší frekvence) snímání, tím lépe lze tento parametr určit, jelikož delší vlnové délky pronikají hlouběji pod povrch (a to do hloubky až 75 cm v případě tzv. P pásma, **obr. 2**) a eliminují tedy příspěvek vegetace popř. efekt topografie.



Obr. 2 Hloubkový dosah radarových dat: Vlnová délka od 2,4 do 3,75 cm (frekvence 12,5 do 8 GHz), C-band: vlnová délka od 3,75 do 7,5 cm (frekvence 8 do 4 GHz), ERS-1 a RADARSAT, S-band: vlnová délka od 7,5 do 15cm (frekvence 4 do 2 GHz), L-band: vlnová délka od 15 do 30cm (frekvence 2 do 1 GHz), SEASAT a JERS-1, P-band: vlnová délka od 30 do 100cm (frekvence 1 do 0,3 GHz), NASA/JPL AIRSAR.

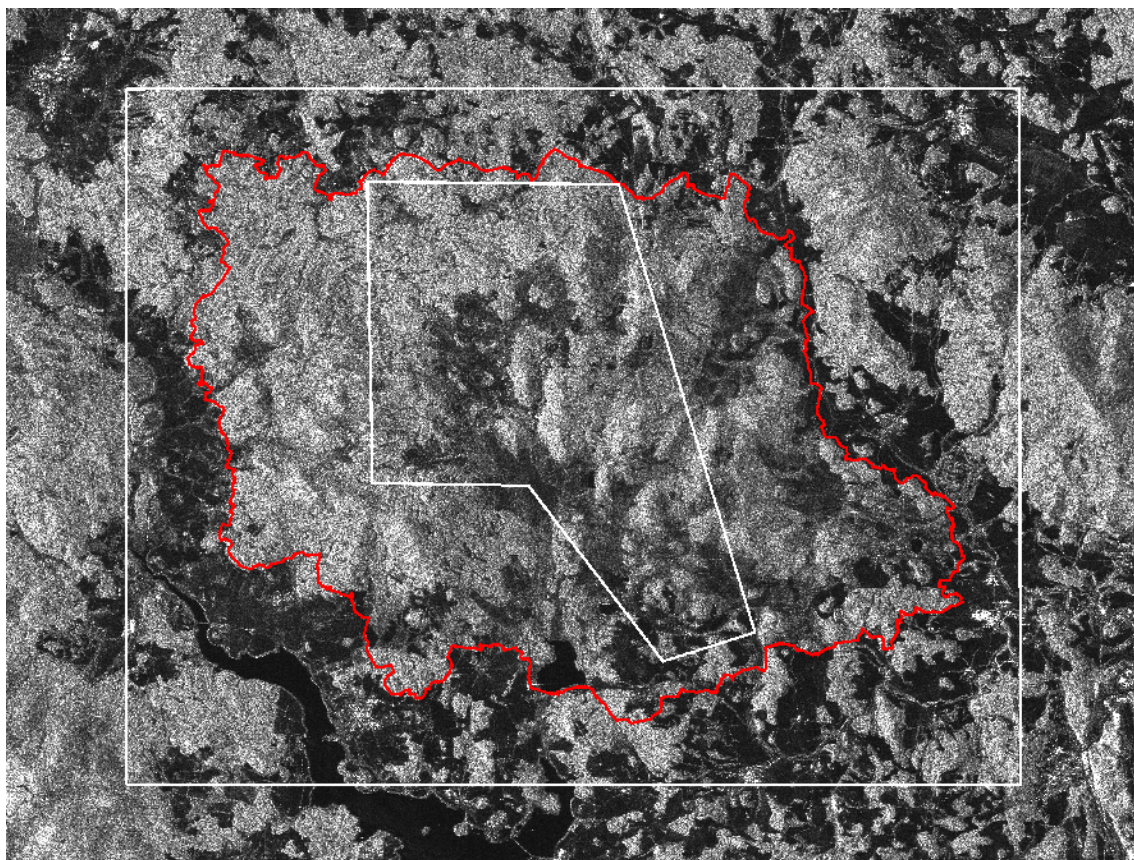
Na základě experimentálních studií bylo zjištěno, že půdní vlhkost je možno počítat z vlnových délek delších než 21 cm (L a P pás, **obr. 2**), přičemž vliv atmosféry lze zanedbat od frekvence menší než 6 GHz (tuto podmínku nesplňuje pouze pás X: X-SAR) (**obr. 2**).

Z nabídky současných senzorů jsou vhodnými příklady družice s dostatečně dlouhou vlnovou délkou - družice ALOS-PALSAR (L), JERS-1 a SEASAT. Prostorové rozlišení těchto senzorů je v rozmezí od několika metrů přes desítky až do 100 metrů v závislosti na velikosti pořizované scény (<http://www.gisat.cz/content/cz/druzicova-data/dodavana-data/radarova-data>). Po zohlednění parametru prostorového rozlišení, snímané vlnové délky a ceny byla pořízena radarová data japonské družice ALOS-PALSAR (tab. 1, **obr. 3**), jelikož vedle dostatečně dlouhé vlnové délky umožňující proniknout až kolem 20 cm pod povrch, dále nabízí i velmi dobré prostorové rozlišení (12,5 m) a data je možno pořídít v duální polarizaci (vertikální i horizontální).

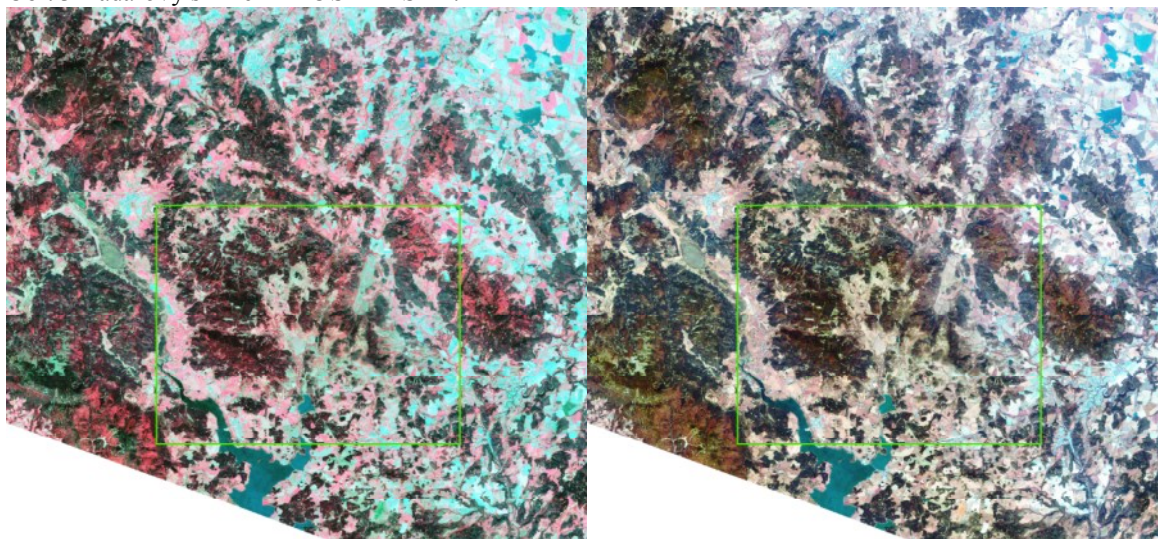
Družicová data Landsat ETM<sup>+</sup> představují v současné době díky svému dobrému prostorovému rozlišení (tab. 1) a dostupnosti (data (**obr. 4**) byla stažena z <http://glovis.usgs.gov/>) optimální data pro interpretace do měřítka 1:50 000. Díky zakrytosti terénu vegetačním pokryvem mají však v ČR limitní využití pro geologické aplikace.

Tab. 1: Parametry družicových dat

senzor	datum snímání	typ dat	prostorové rozlišení
ALOS PALSAR	26. 4. 2008	radarová data pásma L	12,5 m
Landsat ETM+	13.10.2001	panchro	15 m
		multispektrální	28.5 m
	15.9.1999	panchro	15 m
		multispektrální	28.5 m



Obr. 3 Radarový snímek ALOS PALSAR.



Obr. 4 Snímek Landsat 7 ETM+. Vlevo kompozit pásem 432 (vegetace červeně), vpravo 531 jako RGB. Dobře patrná je lhenická zóna ssv. směru ve v. části snímku a poměrně homogenní horninový masív sz. od ní. (<http://glovis.usgs.gov/>).

### 3.1.2 Popis dalších datových vrstev použitých pro analýzu a interpretaci

Jako další klíčový zdroj informací pro celkovou interpretaci byly použity veškeré dostupné geologické mapy měřítek 1:500 000, 1:200 000 (zdroj Archiv ČGS); dále bezešvá vektorová digitální geologická mapa GEOČR50 (zdroj ČGS, dostupné z <http://nts4.cgu.cz/website/GEOinfo/>) a geologické mapy 1:50 000 (DIAMO) z roku 1955. Všechny zlomy zakreslené ve výše uvedených mapách byly zvektorizovány, pokud již neexistovaly ve vektorové podobě.

### 3.1.3 Metodika zpracování

#### Úvod do morfotektonické analýzy využívající distanční data

Geologické a tektonické interpretace postavené na analýze lineárních struktur identifikovatelných na digitálním obraze snímaném buďto letecky (letecké snímky) nebo vesmírnou družicí (satelitní snímky) jsou dlouhodobě a intenzivně využívány od dob, kdy se tato distanční data začala pořizovat. Základní přístupy interpretace lze rozdělit do dvou hlavních skupin – vizuální interpretace a počítačově řízená (automatická) extrakce. Vizuální interpretace byla využívána hlavně dříve (v 70. a 80. a v letech minulého století), tento přístup je však silně zatížený subjektivním názorem jednotlivých interpretujících a konečný výstup se tak může, logicky, od různých autorů výrazně lišit. S nástupem nových technologií a implementací nových SW nástrojů se stále více využívá nových postupů automatické extrakce, které nenesou toto zatížení subjektivní chybou.

Lineamenty pořízené analýzou digitálního obrazu představují většinou polygenetické struktury, a oproti geologickým zlomům, tyto liniové objekty mohou představovat i puklinové systémy popř. zóny oddělující od sebe litologie s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi (zvětrání, alterace, rozdílné hydrogeologické vlastnosti). Koncept interpretace lineamentů lze aplikovat v různém plošném rozsahu a s různou mírou detailu v závislosti na parametrech použitých vstupních dat.

Tektonická predispozice tj. intenzita rozpukání a hustota puklin je fenoménem úzce souvisejícím s intenzitou alterace a větráním hornin. Např. podle Ehlenové (1999), která studovala granitové horniny, se počet a vzdálenost puklin ve zvětralých granitech významně liší od vzdálenosti puklin v čerstvé hornině. Průměrná vzdálenost puklin v čerstvém granitu je více než o 1/3 větší než ve zvětralém (alterovaném) granitu. Až dvojnásobnou frakturaci v alterovaných horninách také popisuje Hutsinpillar (1988). Vztah lineárních struktur (lineamentů) a hydrogeologických podmínek dále popisují např. Kim et al. (2004). Lineární struktury ovlivňují vodní infiltraci a umožňují proudění podzemních vod směrem do hlubších částí.

V rámci tohoto projektu vznikly výsledky interpretace dat DPZ kombinováním dvou základních přístupů: počítačově řízené analýzy radarových dat a vizuální interpretace leteckých stereosnímků, DMR, okrajově i multispektrálních optických dat Landsat. Výsledky analýzy a interpretace dat DPZ byly korelovány a verifikovány s daty získanými pozemním geologickým průzkumem a výsledky letecké geofyziky.

Základní pracovní bloky zpracování a interpretace dat DPZ:

- *Analýza radarových dat* a konstrukce hlavních **lineárních strukturních indikací** \*
- *Vizuální interpretace DMR a multispektrálních optických dat LANDSAT*, konstrukce hlavních **lineárních strukturních indikací** \*
- *Vizuální interpretace leteckých stereoskopických snímků* a konstrukce hlavních **lineárních strukturních indikací** \*
- *Korelace s daty získanými pozemním geologickým průzkumem*: porovnání dat získaných v rámci výše uvedených bodů (nepřímé metody) a následná validace výsledků na podkladě dat získaných terénním průzkumem (přímá metoda)
- *Korelace s daty získanými metodami letecké geofyziky (Miligal, 2009)*

*\*Poznámka: Interpretované lineární struktury navrhuje Drury (1997) a Campbell (1996)) nazývat lineamenty, pokud se jedná o velmi dlouhé struktury regionálního charakteru. U kratších struktur používá např. Drury (1997) termín lineární jev (linear feature). Termín lineament je poněkud problematický, v literatuře nabývá často velmi mnoho různých významů. V této práci jsou interpretované lineární strukturní prvky nazývané **lineární strukturní indície**. Jedná se o ty lineární prvky, které mají projevy ve více typech distančních dat (radar, DMR), nebo jsou dokladované také terénními strukturními měřeními. Lineárními strukturami jsou nazývané lineární strukturní prvky měřené v terénu (lineace, ohlasy).*

## Analýza radarových dat

Pro analýzu radarových dat (**obr. 3**) byla použita nová metoda automatické extrakce liniových prvků z digitálního obrazu (Kopačková, 2007). Nalezené lineární struktury se pak staly vstupem pro výpočet nové vrstvy ukazující zóny, které se liší intenzitou výskytu liniových objektů v rámci nadefinované plochy. Na základě této vrstvy byly vizuálně interpretovány významné lineární strukturní indície (**obr. 5**).

Nová metoda se skládá ze tří pracovních bloků:

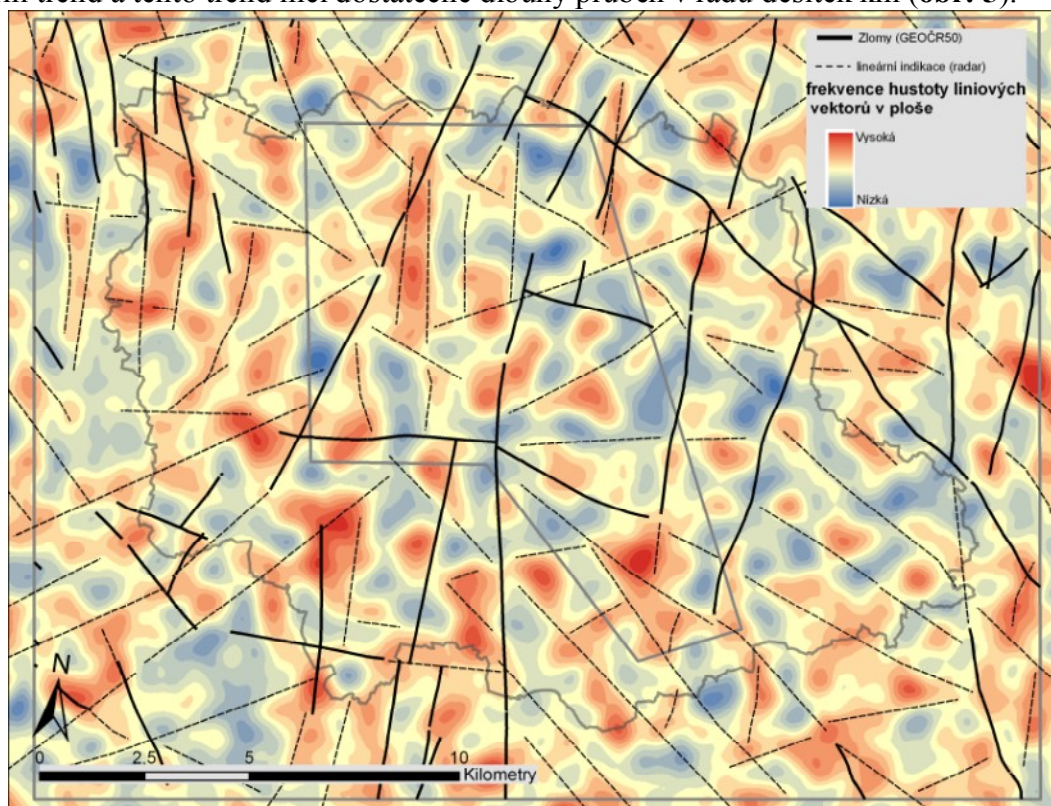
1. Dvojstupňová úprava obrazu:
  - Výpočet gradientu (1. stupeň transformace) a aplikace směrových filtrů pro zvýraznění liniových objektů (2. stupeň transformace) všech 4 základních směrů (S-J, V-Z, SV-JZ, SZ-JV)
2. Klasifikace liniových objektů identifikovaných v digitálního obrazu radarových dat
3. Konverze liniových objektů na vektorové linie (vektory) a jejich vyhlazení (generalizace) pomocí funkce Line Directional Mean (LDM).

Radarová data použitá v rámci této studie umožňují zachytit změny v dielektrických vlastnostech půdního/horninového prostředí cca 20 cm hluboko pod povrchem. Liniové vektory derivované z radarových dat tak odrážejí především rozdíly mezi půdními typy a obsahem vody, příspěvek vegetace popř. efekt topografie je v tomto případě minimalizován. Z výše uvedených faktů však vyplývá, že identifikované liniové vektory jsou polygenetické povahy. Vedle geologickým zlomům mohou dále indikovat i puklinové systémy a dále zóny oddělující od sebe litologie s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi (permeabilita, zvětrání, alterace,) a půdní typy vzniklémi na rozdílném horninovém substrátu.

Pro geostatistické vyhodnocení hustoty liniových vektorů v ploše byla použita funkce Kernel Density dostupná v rámci extenze Spatial Analyst, prostorový dosah (rádius) byl nastaven na 600 m. Tento algoritmus počítá význam jednotlivých buněk pomocí interpolace nového hladkého povrchu počítaného vždy z počátečního bodu výskytu vektoru v rámci nadefinovaného dosahu (největší hodnota je v místě počátku vektoru, nulová pak v posledním buňce nadefinovaného dosahu). Běžné metody počítají pro každou celou rastru počet objektů v rámci nadefinovaného kruhového dosahu kolem každé celé rastru. Naproti tomu výsledný povrch vypočítaný pomocí Kernelovy kvadratické funkce rozvrhne hodnoty (váhy cel) v rámci nadefinovaného dosahu tak, aby v místě počátku linie byly hodnoty maximální a v koncové buňce nadefinovaného rozsahu pak nulové.

Nově vypočítaná vrstva vyjadřuje změnu frekvence hustoty liniových vektorů v ploše a dalším statistickým klasifikováním jejich hodnot, v našem případě byla použita klasifikace do 5 kvantilů, lze vytvořit výstup rozdělovací zóny s nízkou, střední a vysokou intenzitou porušení (plošnou frekvencí výskytu liniových vektorů) (**obr. 5**).

Nově vytvořený rastr vyjadřující plošnou změnu frekvence hustoty liniových vektorů identifikovaných na podkladě radarových dat sloužil pro další interpretaci. Hlavní lineární strukturní indicie byly konstruovány tam, kde vysoká plošná frekvence vektorů vykazovala lineární trend a tento trend měl dostatečně dlouhý průběh v řádu desítek km (**obr. 5**).



Obr. 5 Plošná změna frekvence hustoty liniových vektorů identifikovaných na podkladě radarových dat interpretované lineární strukturní indicie.

#### Vizuální interpretace DMR a multispektrálních optických dat Landsat

Jako hlavní datový zdroj pro vizuální interpretaci byly použity *digitální modely reliéfu*, pro doplnění informací byla také vyhodnocena *optická družicová data Landsat ETM+* (barevné syntézy pásem 321, 432, 531 nebo 753 jako RGB). Tato data mají jen omezenou vypovídací schopnost, protože terén je prakticky kompletně zakrytý vegetací. V několika případech byla kontinuita některých prominentních struktur (např. ve lhenické zóně, viz **obr. 3**) lépe identifikovatelná ve snímcích Landsat. V těchto případech se jedná o projevy nepřímých morfologicko-vegetačních indicií.

Nejpřesnější datový zdroj elevačních dat, dostupný pro území celé České republiky, představují digitální výškopisná data zpracovávaná Zeměměřickým úřadem v rámci projektu ZABAGED. Jedná se o zdigitalizované vrstevnice Základní mapy ČR 1:10 000. Vrstevnice jsou k dispozici v základním výškovém intervalu 2 m a s doplňkovým intervalem 0.5 m v Křovákově zobrazení v souřadnicovém systému JTSK. Digitální vektorové vrstevnice ZABAGED byly poskytnuty od zadavatele pro všechny klady listů ZM 1:10 000 zasahující do vymezených lokalit. Na základě těchto dat byl vygenerován TIN a převeden do rastrové reprezentace s velikostí pixelu 5 m a výškovými hodnotami zaokrouhlenými na metry. Pro vyhodnocení regionálních souvislostí širšího okolí byl použit digitální model reliéfu SRTM, dále byla využita také výškopisná data vygenerovaná z DMU25. Na základě digitálních modelů terénu (DMR, popř. DTM) bylo připraveno několik variant stínovaného reliéfu, a to

s osvitem od SZ (azimut 315°), S (azimut 0°) a SV (azimut 45°), tyto podklady byly využity pro následnou vizuální morfotektonickou interpretaci (**obr. 6**).

V souladu se zadáním projektu byla pozornost při zpracování údajů DPZ koncentrována na zhodnocení strukturního porušení oblasti včetně jeho širšího okolí na základě geomorfologických kritérií (Pospíšil et. al., 2004). Pro tyto cíle byla provedena vizuální morfotektonická interpretace pro celé území širšího zájmu včetně jeho širšího okolí. Vzhledem ke stávajícím podmínkám jsme se zaměřili na vymezení lineárních strukturních indikací, které bylo možno identifikovat při různých osvitech DMR.

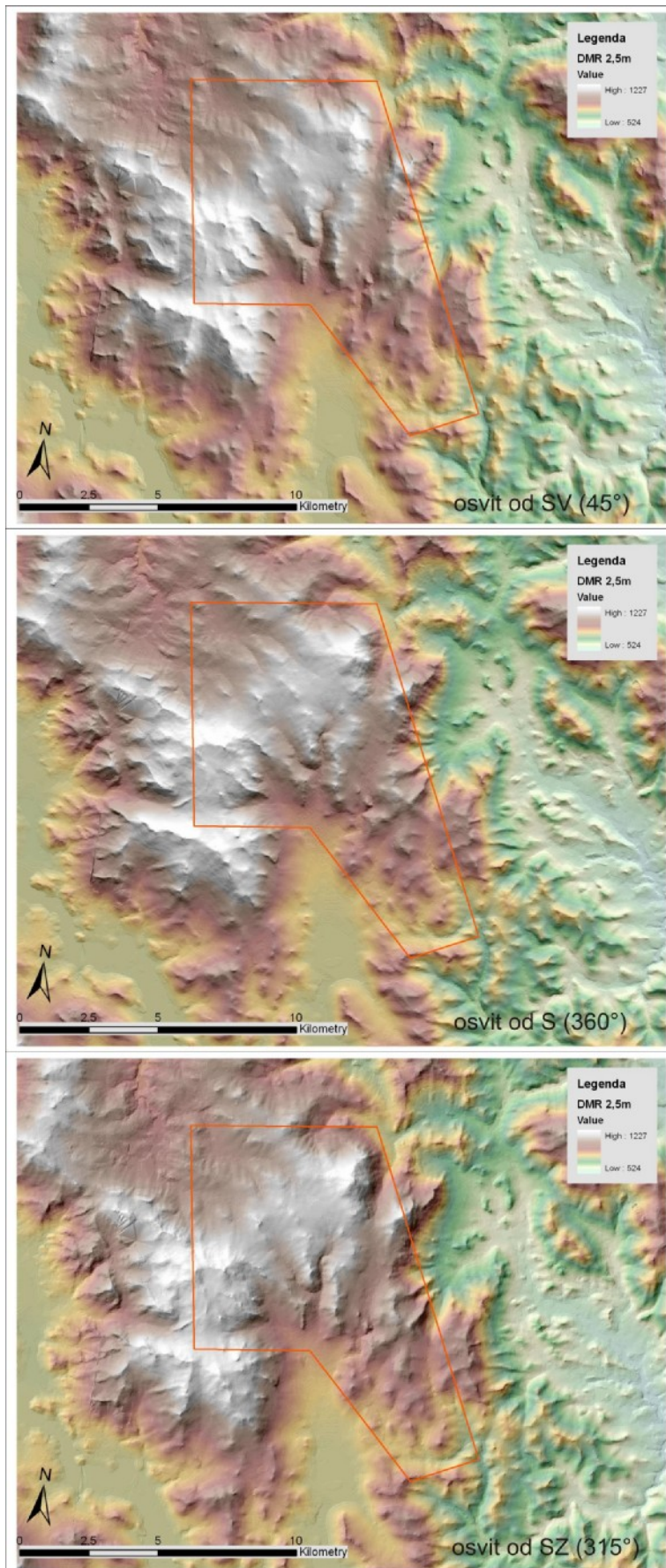
#### Vizuální interpretace leteckých stereoskopických snímků

Tento druh interpretace patří mezi jednu z klasických nepřímých metod používaných v oblastech strukturní a morfologické interpretace. Cílem analýzy je vymezení a vysvětlení geneze nejrůznějších morfotektonických forem, které vytváří celkový ráz reliéfu. Interpretační práce se zaměřují na exodynamickou analýzu vývoje reliéfu, snaží se geneticky rozlišit jednotlivé tvary, formy a případně celky (jednotky), které se vztahují k jednotlivým etapám jeho vývoje a k jeho genezi. Komplexní studium vývoje reliéfu je postaveno na interpretaci strukturní a tektonické (endogenní) predispozice, na studiu exogenních procesů a následném vztahu mezi definovanými endogenními a exogenními faktory.

Exodynamická analýza vývoje reliéfu pro území „Boletice“ vznikla pouze na základě interpretace stereoskopických měřických leteckých snímků z roku 1983. Terénní ověření nebylo uskutečněno, a proto se jedná pouze o prvotní interpretaci, po které by mělo následovat terénní mapování a dopracování výsledků interpretace leteckých snímků.

Korelace strukturních indikací interpretovaných z radarových dat, DMR, optických dat Landsat a stereoskopických snímků s terénními strukturními měřeními a výsledky letecké geofyziky je dále detailně diskutována v kapitolách 5.1 a 5.2.





Obr. 6 Stínovaný reliéf s osvitom 45°, 360° a 315°.

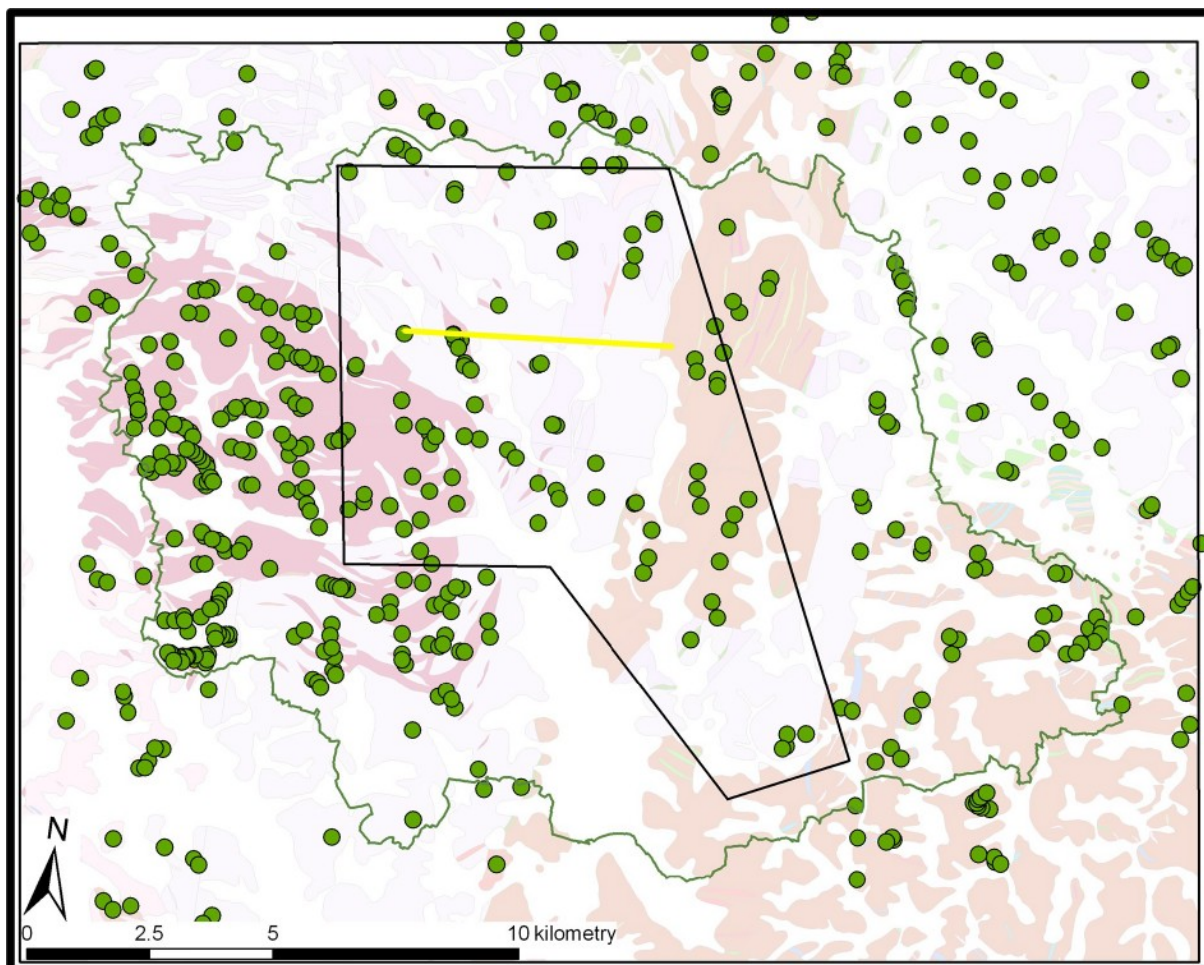
## 3.2 Terénní průzkum

### 3.2.1. Popis terénních prací a charakteristika dat

V rámci definovaného širšího polygonu byla za účelem kvalitativního posouzení výstupů analýzy Dálkového Průzkumu Země (DPZ) ve výchozových partiích provedena terénní strukturní analýza prvků duktilní, křehce-duktilní a křehké deformace hornin. Na 525 dokumentačních bodech bylo zpracováno 2516 jednotlivých tektonických měření (**obr. 7**), z nichž 953 reprezentativních zástupců je zahrnuto v příloze - terénním dokumentačním deníku. Terénní měření představují jednoznačný doklad existence a dále možnost rozlišení jednotlivých strukturních prvků (foliace, střížná zóna, zlom, střížná puklina, puklina), avšak dokumentují jednotlivé výchozy v omezeně odkrytém terénu bez širšího kontextu, s omezenou možností vyhodnotit regionální rozsah popsanych struktur. Terénní výzkum spočíval v měření prostorové orientace a popisu charakteru různých typů planárních a lineárních struktur v metamorfovaných horninách (metamorfních foliací a lineací), včetně jejich vzájemné superpozice. Dále, u intruzivních hornin plutonu Knížecího Stolce byly měřeny orientace magmatických a submagmatických staveb (přednostní prostorové orientace horninotvorných minerálů) a orientace intruzivních kontaktů. Databáze výše zmíněných duktilních staveb byla z velké části vytvořena syntézou archivních zdrojů autorů zaměřených detailní analýzu metamorfních a magmatických staveb ve studované oblasti.

V případě iniciální analýzy křehké tektoniky byly práce zaměřeny převážně na oblast vymezeného území polygonu hypoteticky vhodnou pro vybudování HÚ. Jednalo se o posouzení orientace, charakteru, vztahů a případně kinematiky dílčích planárních struktur křehce-duktilní a křehké deformace (střížných a zlomových zón, extenzních a střížných puklin s indikátory pohybu - striacemi).

Validace distančních indikací terénními daty představuje prostorovou korelaci směrů struktur dokumentovaných na výchozech se směry blízkých lineárních indikací. Mezi zlomy kategorie 3 (Walker 2009, viz také kapitola 5.2) byly zařazeny pouze indicie, v jejichž bezprostředním okolí byly dokumentovány subparalelní mezoskopické zlomy na výchozech. Podobně do kategorie 5 byly řazeny indicie, v jejichž bezprostředním okolí se nacházejí výchozy s výrazným subparalelním puklinovým systémem.



Obr. 7 Zjednodušená geologická mapa širšího polygonu s lokalizací terénních dokumentačních bodů. Identifikační čísla a geografické souřadnice viz příloha terénní dokumentační deník (viz datové přílohy/dokumentační deník, CD). Žlutá linie vyznačuje navrhovaný průběh geofyzikálního profilu, zelená linie ohraničuje území VÚ Boletice, dále je vyznačeno území širšího zájmu (větší, černě ohraničený obdélník) a vymezené území (menší, černě ohraničený nepravidelný polygon).

## 4. Interpretace a výsledky

### 4.1 Morfotektonická analýza

#### 4.1.1 Exogenní dynamika postavená na podkladě leteckých snímků

Na podkladě stereoskopických snímků byly identifikovány endogenní, denudační a akumulární formy detailně popsány níže. Endogenní formy byly dále porovnány jak s terénními strukturálními měřeními, tak i se strukturami již identifikovanými v rámci předcházející interpretace dat DPZ a DMR. Několik nově identifikovaných struktur (vedle známých zlomů z geologických map), korespondovalo s již definovanými strukturami v DMR a radaru, přičemž spadalo do kategorie 4-5 (Wolker 2010, viz také kap. 5.2). Informace o jejich identifikaci v leteckých stereo-snímcích byla přidána do atributového sloupce. Vzhledem k tomu, že díky této analýze byly identifikovány i další morfologické prvky a fenomény, které mohou být užitečné v dalších oblastech hodnocení lokality a její vhodnosti pro účely vybudování úložiště je tato datová vrstva, s morfotektonickými prvky popsány níže, součástí přílohy (viz datové přílohy/exogenní morfologické formy, CD).

### **Endogenní formy**

*Morfologicky zřejmý průběh zlomu* jako výsledek tzv. endogenní predispozice vývoje reliéfu. Horninové prostředí je na Šumavě velmi heterogenní a komplikované. Podél zlomů jsou horniny obvykle více narušené, toto se projeví především vyšším stupněm zvětrávání a eroze. Zlomové linie tak tvoří obvykle rovné úseky údolní sítě, rovné úpatí svahu, které nemají jiné exogenní vysvětlení a přitom navazují, nebo korespondují s ověřenými zlomy v geologii.

*Morfologicky předpokládané zlomy* vytváří méně výrazné, rovné úseky údolní sítě, seřazené do jednoho směru nebo do sítě zlomového systému, který je i geologicky podložený.

*Obnaženou zlomovou plochou* jsou svahy, navazující na zlomy (např. jako zlomový svah ústupový svah, svah kvestoidu, erozní svah, strukturmí svah apod.). Vznik těchto útvarů je podmíněn denudací a následným selektivním obnažením geologické stavby. Na zlomech jsou horniny obvykle méně rezistentní a tím podléhají rychleji erozi.

*Kvestoid (monoklina)* je asymetrická strukturně predisponovaná forma, představuje ukloněnou (obvykle foliační) plochu na relativně rezistentní poloze metamorfitů. Vzniká tzv. optimální denudační plocha (mírněji ukloněná) a prudký svah, kde eroze řeže strukturu kolmo. Vzhledem k tomu, že struktury prošly denudačním řezem, vznikl zde i tzv. inverzní reliéf, ve kterém jsou např. vypreparovány některé ukloněné monokliny (kvestoidy).

*Vypreparované polohy rezistentních hornin* tvoří skalní výchozy velmi rezistentních žil, které mají obvykle lineární průběh (křemenné, porfyrové, aplity apod.).

### **Denudační formy**

*Erozní hrany* jsou ostrá svahová rozhraní charakteristická změnou sklonu svahu mezi plochými nebo mírně ukloněnými svahy a strmými svahy erozních údolí.

*Erozní koryta* jsou místa, kde díky stále působící erozi nevzniká údolní akumulace. Obvykle je to v místě, kde erozní údolí vznikající hloubkovou erozí proráží rezistentnější polohu (např. žílu).

*Erozní svahy* tvoří prudké svahy erozních údolí, s často vystupujícím obnaženým geologickým podloží. Svahy jsou místy více či méně pokryté koluvii. Ve vyšší nadmořské výšce bývají podél erozní hrany mrazové sruby, které produkovaly velké množství bloků a úlomků, které nyní leží na svazích a při jejich úpatí.

### *Pravděpodobné zóny hlubších reziduálních zvětralin*

*hluboké eluvium – mechanické zvětrání* – vlivem mrazové desintegrace hornin v období pleistocénu, která byla v nadmořských výškách Šumavy velmi intenzivní, a kdy lze předpokládat i vznik hlubšího permafrostu, vznikaly na náhorních plošinách mocné mechanické zvětralin. Tyto zvětralin podléhaly intenzivní soliflukci a jen sporadicky vystupují na povrch, často jsou překryty akumulacemi soliflukce. Nejčastěji se zachovaly a vystupují až na povrch v plochých sedlech a na plochých rozsochách méně rezistentního podloží (hrubozrná žula, popř. perlová rula), kde mohou mít polycyklický vývoj. *Hluboké eluvium – chemické zvětrání* – tzv. fosilní kaolinické a lateritické zvětralin, kdy jsou horniny rozloženy do jílových minerálů a zachovaly se pravděpodobně pouze jako malé zbytky původního terciárního zvětralinového pláště. Jejich rozsah se velmi těžko dá zjistit, protože jsou obvykle překryty mladšími koluvii, jsou s nimi prověřené.

### **Formy akumulací**

*Výplň údolních niv včetně výplně prameništích uzávěrů* – charakter údolní nivy je dán obvykle její geomorfologickou polohou. Nivy na šumavských pláních jsou obvykle šterkovité až šterkopísčité s polohami rašeliny. Šterky jsou obvykle jen oválené až poloopravené. V hlubokých erozních údolích zařezávajících se do zarovnaných povrchů jsou nivy balvanité až šterkovité. V okolí toků, které erodují ve zvětralinách žul nebo granulitů, lze předpokládat, že dochází k selektivnímu odnosu jemné frakce zvětralin a na místě zůstávají ležet pouze velké bloky, které tvoří více či méně rozsáhlé plochy. Polygenetická výplň úvalovitého údolí nebo prameništích deprese v horních částech mělkých a širokých údolí a jejich prameništích uzávěrů tvoří uloženiny koluviálního původu, převážně vzniklé soliflukcí. Tyto uloženiny tvoří blokové, blokovokamenité a hlinitokamenité výplně, kde malý tok nemá sílu beze zbytku transportovat materiál dále po směru toku. Proto se většina uloženin hromadí na dně mělké úvalovité deprese a je obvykle velmi zvodnělá, a vzniká tak více či méně mocná rašelina. Uloženiny jsou nepravidelně rozmístěné a nevytváří ostré rozhraní vůči koluviálním akumulacím na svahu. Omezení rašeliníšť do svahu je individuální, podle toho jaký je přítok podzemní vody. Vznikají i menší rašeliníšť prameništích. V nejbližším okolí toku je uloženina vymývána, je odnášena jemná frakce a zůstávají pouze velké a těžké bloky.

*Výplavový kužel* – nedokonale opravené šterky uložené ve formě kuželu obvykle na soutoku s hlavním tokem, v depresi nebo na úpatí pohoří. Na Šumavě se vytváří také i tzv. vložené výplavové kužely v rámci nivy, obvykle pod erozním stupněm v podélném profilu toku. Výplavové kužely jsou veskrze zvodnělé a vytváří se na nich rašeliníšť. Výplavový kužel často uzavírá lokální depresi mezi ním a údolním svahem nebo druhým výplavovým kuželem. Vznikne více či méně hluboká povrchově uzavřená deprese, kde se hromadí např. slatiny.

*Koluvium (svahoviny)* – Terénní poznatky ukazují, že většina svahů Šumavy byla v pleistocénu postižena intenzivní soliflukcí zvětralin. Zvětralin byly přemístěny na různé vzdálenosti. Řádově stovky metrů až několik kilometrů. Mocnost přechodných soliflukovaných uloženin kolísá, ale v průměru se pohybuje mezi 1 – 2 metry. Mocnost soliflukcí uložených akumulací narůstá ve dnech mělkých a širokých údolí. V erozních údolích byly retransportovány do aluviálních až fluviálních uloženin a jejich mocnost nenarůstala. Někde jsou přemístěny i velké bloky rezistentních hornin jako jsou porfyry nebo prokřemenělé ruly a migmatity. Charakteristickým jevem je zmenšující se velikost bloků a úlomků směrem po svahu, mrazová desintegrace pokračovala a zmenšovala jejich velikost. Totální mrazovou desintegrací obvykle rezistentních hornin vznikají kamenná moře, která jsou více či méně přemístěná. Na svahu se díky působící gravitaci a soliflukcí přemísťují, až někdy celý svah zakryjí. Půdní profil se nemůže vytvořit, protože vznikají pouze bloky nebo větší úlomky (litologická predispozice je prioritní), které se navíc přemísťují a tudíž brání uchycení vegetace.

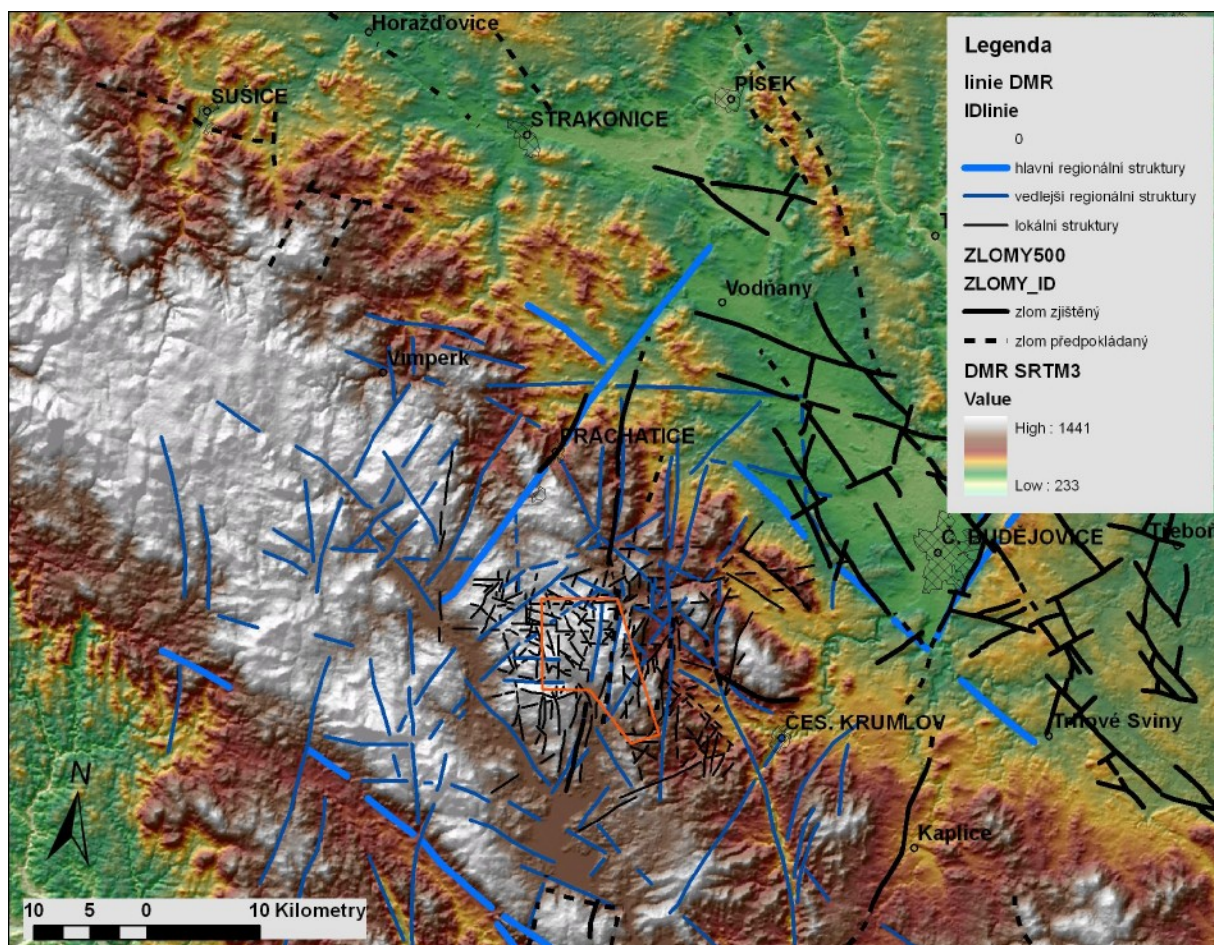
*Rašeliníšť a ostatní humolity* – Ve studované oblasti se nachází jak ombrogenní vrchovišť, tak prameništích rašeliníšť, dále i nivní slatiny. Plochá sedla a rozsochy byly vystaveny dlouhodobému polycyklickému zvětrávání, takže se vytvořila hluboká eluvia, která už mohou obsahovat i jílovité minerály. Tím vzniká nepropustné podloží, které vytváří vhodné prostředí pro vývoj ombrogenních rašeliníšť.

*Paleoúdolí v inverzní pozici s polycyklickou výplní* – západně osady Mýtina se zachoval zbytek plošinatého paleoreliéfu tvořeného původně synklinální strukturou, která je však v

současné době v inverzní poloze (tvoří elevaci). Vzhledem k tomu, že se jedná o jeden z nejstarších zbytků paleoreliéfu, lze předpokládat, že jeho povrch je hluboce polycyklicky zvětrán a nese hluboké zvětralinny, které jsou zvodnělé a vznikají na nich četné humolity a rašeliny.

#### 4.1.3 Strukturně tektonická analýza na podkladě distančních snímků

Morfotektonická interpretace distančních dat (radar, DMR, Landsat) území širšího zájmu a jeho okolí ukazuje důležité regionální souvislosti: Dominanci sz. tzv. bavorských zlomů paralelních s dunajskou zlomovou zónou a k nim konjugovaný systém ssv. zlomů (střížných zón), např. lhenická zóna. Oba tyto dominantní směry byly identifikovány pomocí analýzy radarových dat (**obr. 5**) i vizuální interpretace DMR popř. satelitních dat Landsat (**obr. 8**). Předpokládáme, že tyto křehké struktury se velmi významně uplatňují v utváření recentní morfologie. Na základě geomorfologie a stáří hornin, které deformují, je možné se domnívat, že některé zlomové struktury byly reaktivovány přinejmenším v kenozoiku. Z hlediska znalostí o charakteru a orientaci současného napětového pole není možné vyloučit ani recentní reaktivaci odpovídajících zlomových struktur. Tyto skutečnosti by pomohl prokázat podrobný seismický výzkum a datování vývoje současného reliéfu.



Obr. 8 Širší regionální morfotektonická interpretace ukazuje dominanci sz. tzv. bavorských zlomů paralelních s dunajskou zlomovou zónou a k nim konjugovaný systém ssv. zlomů (střížných zón), např. lhenická zóna. Vyznačeny jsou také zlomy z geologické mapy 1:500 000 (silná černá čára, GEOČR500, 1998).

Další podrobný popis a zhodnocení struktur je uveden v kapitolách 5.1 a 5.2.

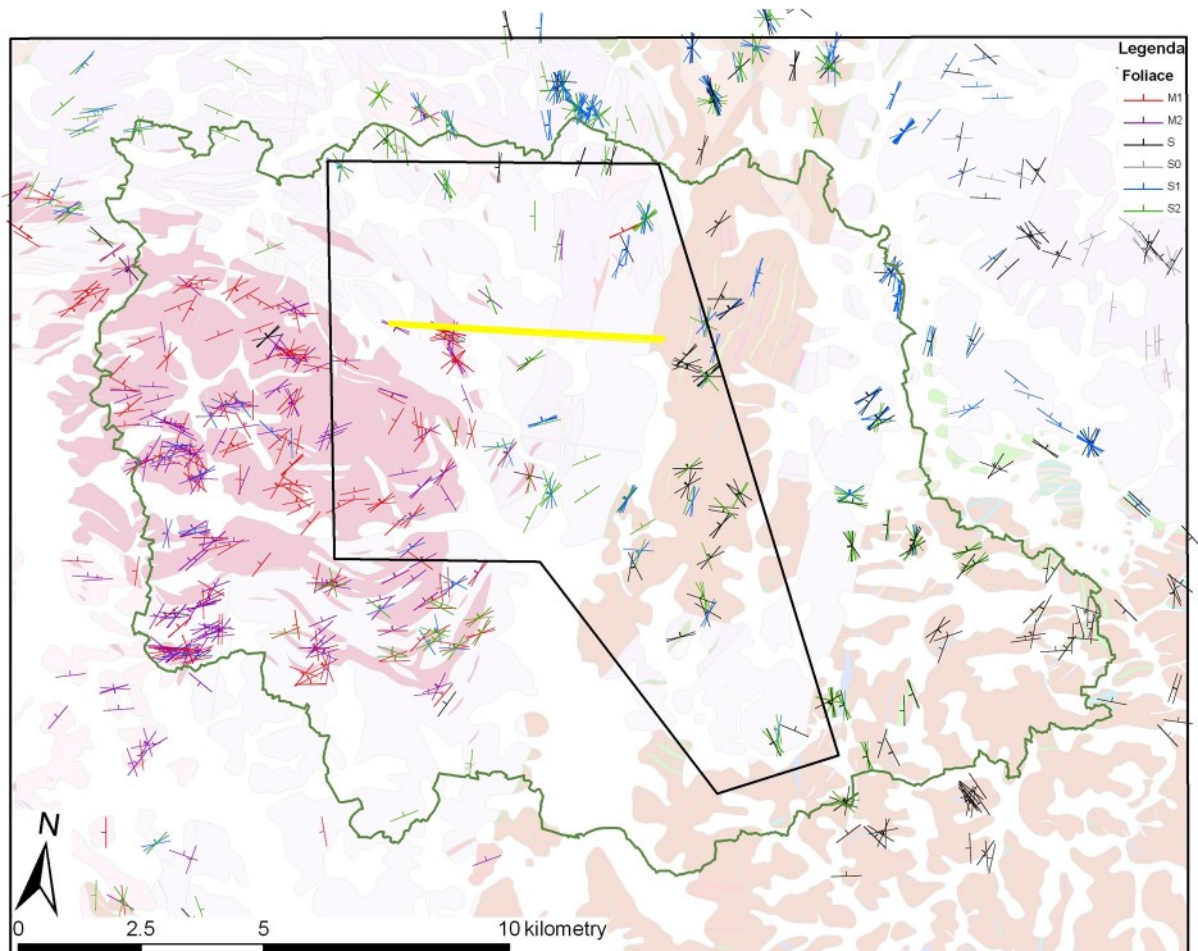
## 4.2 Výsledky vyplývající z terénního průzkumu

### 4.2.1 Popis získaných dat

#### 4.2.1.1 Prvky duktilní tektoniky

##### *(i) Pluton Knížecího stolce (PKS)*

Durbachity plutonu Knížecího Stolce tvoří těleso o rozměrech přibližně 10x7 km a větší množství výrazně protažených tělísek charakteru "sheet-like bodies", které jsou v zóně do 3 km orientovány subparalelně s externími kontakty intruze. Kontakty durbachitů s okolními horninami KGM mají intruzivní charakter a nejsou sekundárně tektonicky modifikovány. Kontakty v severní části tělesa upadají pod strmými až středními úhly k jihu, na východě pak pod strmými až středními úhly k západu. V rámci výchozových partií je patrná mírná diskordantní orientace kontaktů vůči průběhu dominantních metamorfních staveb  $S_1$  v okolních horninách (**obr. 9**). V případě hornin plutonu Knížecího Stolce je možné identifikovat dvě odlišné stavby magmatického stadia vývoje intruze - definovány na základě charakteru a variability v přednostní prostorové orientaci agregátů živců a biotitu, xenolitů, šlírů a jejich vzájemné superpozice: (i) relativně starší ( $M_1$ ) – slabší intenzity a plošně nerovnoměrného výskytu převážně podél okrajů intruze. Stavby  $M_1$  jsou subparalelní orientace ve vztahu k mapovaným intruzivním kontaktům. V centrálních partiích plutonu jsou stavby  $M_1$  zachovány reliktně (v rámci mladších staveb) a upadají pod středními až strmými úhly k SZ. (ii) Relativně mladší stavby ( $M_2$ ) jsou záznamem refoliace staveb  $M_1$  do ploch ukloněných pod středními až mírnými úhly k SZ až S, se znaky relativně ostré vzájemné superpozice. Tyto ploché foliace  $M_1$  nesou stejně jako v případě okolních granulitů (stavby  $S_2$ ) lineace S-J orientace. Tyto stavby mají ve středních částech plutonu penetrativní charakter. Stavby  $M_2$  mají často tranzitní charakter s přechodem od magmatických k submagmatickým, lokálně i subsolidovým stavbám, které vznikají kontinuálně v závěrečné fázi krystalizace plutonu.



Obr. 9 Zjednodušená geologická mapa širšího polygonu s vyneseními tektonickými značkami terénních měření zlomových struktur (M, S). Žlutá linie vyznačuje navrhovaný průběh geofyzikálního profilu, zelená linie ohraničuje území VÚ Boletce, dále je vyznačeno území širšího zájmu (větší, černě ohraničený obdélník) a vymezené území (menší, černě ohraničený nepravidelný polygon).

### ***(ii) Křišťanovský granulitový masív (KGM)***

Dominantní duktilní deformační stavbou v severozápadní části Křišťanovského granulitového masívu (KGM) je strmě až středně ukloněná penetrativní metamorfní foliace charakteru kompozičního páskování a přednostní prostorovou orientací minerálů (indexována jako  $S_1$ ). V severozápadní části polygonu upadá pod strmými úhly k jihu, ve střední části se postupně stáčí do S-J směru se strmým až středním úklonem k západu. Průběh těchto planárních staveb, v regionálním měřítku subkoncentrického charakteru řídí prostorovou orientaci dílčích variet různé retrográdní přeměny granulitů KGM a koresponduje s externími hranicemi masívu. V rámci těchto penetrativních staveb jsou ve velmi omezeném rozsahu pozorovány relikty starších deformačních struktur, nejčastěji ve formě izoklinálních a odškrcených vrás centimetrového až decimetrového měřítko. Celý komplex staveb je pak heterogenně refoiován do horizontálních až mírně k ~ SZ ukloněných ploch (stavby tohoto charakteru souhrnně indexovány jako  $S_2$ ). Tyto metamorfní foliace pak nesou výrazné lineace charakteru protažení křemen-živcových a biotitových agregátů přibližně S-J orientace. V jižní části masívu dominují výrazně retrográdně postižené granulitové ruly s velmi dobře (penetrativně) vyvinutou metamorfní stavbou  $S_2$  (metamorfní foliace subhorizontální orientace). Starší metamorfní stavby  $S_1$  jsou v této části masívu zachovány pouze reliktně. Zvyšování intenzity výskytu staveb  $S_2$  v rámci S-J profilu granulitovým masívem má pozvolný charakter, úměrný zvyšující se míře retrográdního přetisku směrem k jihu.



### ***(iii) Monotónní skupina Lhenické Zóny (LHZ)***

Horniny monotónní skupiny vystupují v rámci tzv. Lhenické zóny (LHZ), v cca 3 km širokém a strmě uloženém pruhu S-J orientace. V rámci širšího polygonu vystupují v jeho střední a východní části. Jedná se o migmatitizované pararuly a migmatity s hojnými vložkami kvarcitů, kvarcitických rul a polohami granátem bohatých rul. Nejstarší mapované foliace upadající strmě k západu a nesou znaky relativně intenzivního syntektonického parciálního tavení, které vedlo ke vzniku migmatitického páskování (nepravidelné střídání pásků leukosomu a melanosomu). Tyto stavby jsou napříč tělesem LHZ v subsolidových podmínkách heterogenně přetištěny (převrásněny) do formy nové metamorfní stavby. Tyto nové metamorfní foliace mají subhorizontální orientaci a nesou lineace charakteru duktilního protažení agregátů živců, křemene a slíd, převážně S-J orientace. Míra tohoto přetisku mírně klesá směrem od S k J.

### ***(iv) Masív Blanského lesa (MBL)***

V převažujícím objemu MBL dominují retrográdní metamorfní foliace, které vykazují syntektonický rozpad granátu na biotit a kyanitu na silimanit. Tyto stavby obsahují relikty starších vysokotlakých staveb, obvykle zvrásněné, nejčastěji do formy izoklinálních vrás. Retrográdní stavby mají v regionálním měřítku sigmoidální průběh subparalelní orientace s mapovanými okraji MBL. V rámci širšího polygonu, v západní části MBL, se penetrativní foliace granulitů uklánějí pod středními úhly převážně k západu a nesou lineace ukloněné pod mírnými až středními úhly k severu. Orientace staveb v jižním zakončení granulitového tělesa je pravděpodobně sekundárně modifikována rotací do V-Z směrů. Variabilita v orientaci výše popsaných staveb byla pravděpodobně způsobena vlivem zvrásnění MBL do formy asymetrické megavrasy (složitá necylindrické struktury značného hloubkového dosahu; odhadem >10 km), což podporují i výsledky 1409 m hlubokého vrtu Holubov.

### ***(v) Českokrumlovská pestrá skupina (ČKPS)***

Tato jednotka v rámci širšího polygonu vystupuje na jeho jihovýchodním okraji. ČKPS je tvořena pararulami s hojnými vložkami amfibolitů, krystalických vápenců, erlanů, kvarcitů a ortorul. Strukturní záznam lze částečně korelovat s jednotkou LHZ. V horninách jsou zachyceny vzácné relikty starší stavby ukloněné pod strmými úhly generelně k severozápadu, které byly intenzivně přetištěny mladší foliací se středními až mírnými sklony generelně k Z až SZ. V centrálních částech ČKPS je dále patrná částečná modifikace orientace mladších staveb do formy otevřených vrás až kilometrových rozměrů. Tyto vrasy pak směrem k jihovýchodu postupně vyznívají. V severních částech jednotky byly mapovány metamorfní stavby subparalelní k sigmoidálně prohnuté jihozápadní hranici mezi ČKPS a MBL.

#### 4.2.1.2 Prvky křehké tektoniky

V rámci všech mapovaných litologií a jednotek (viz. přehled a definice výše) byly identifikovány a charakterizovány základní struktury křehkého porušení, tedy zlomy spolu se zlomovými zónami, střížnými puklinami a střížnými zónami, a extenzní pukliny.

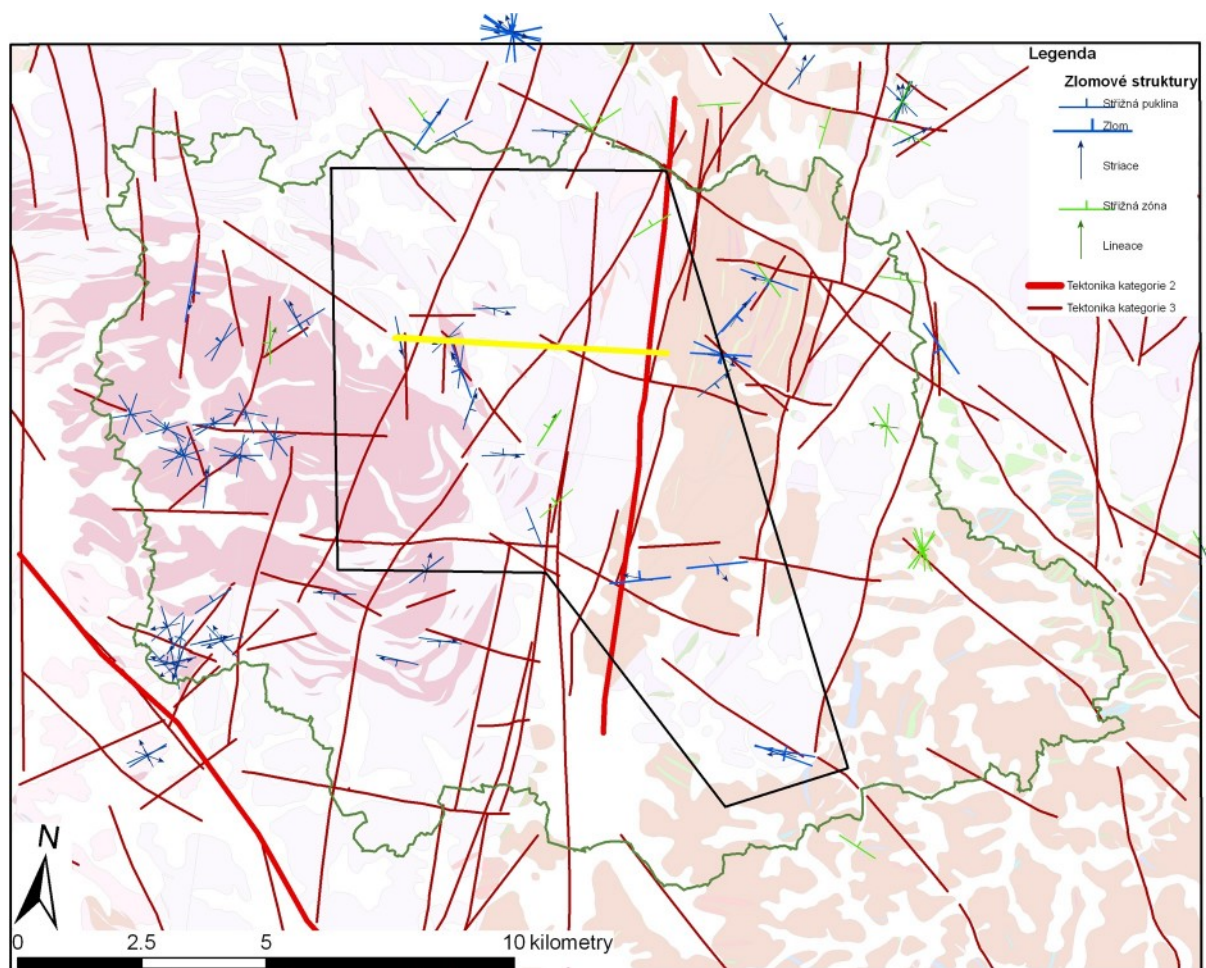
Zlomové zóny, zlomy, střížné pukliny a střížné zóny

Jedná se o plochy křehké deformace s přítomností pohybových indikátorů (striací a lineací, **obr. 10, 11**). Hlavní rozdíl mezi zlomovými strukturami a střížnými puklinami je v magnitudě přemístění, přičemž konvenční hranice je stanovena na 1 metr.

V případě plutonu Knížecího Stolce (PKS) byly identifikovány dva hlavní systémy zlomů a střížných puklin: (i) Plochy bez minerální výplně upadající pod strmými úhly k ZSZ až SSZ nesoucí striace bez prokazatelných kinematických indikátorů, které upadají pod mírnými úhly k S. (ii) Plochy strmé orientace v průběhu ZSZ-VJV až SSZ-JJV, místy asociované s drobnými aplitovými žilkami (v mocnosti do 2 cm). Tyto plochy nesou místy relativně výrazné striace subhorizontální orientace s indikátory pravostranné kinematiky. Mezi další identifikované zlomové systémy, ovšem podřízeného rozsahu, patří subvertikální struktury V-Z a S-J orientace a dále střížné pukliny subhorizontální orientace.

V rámci tělesa Křišťanovského granulitového masivu (KGM) byla pořízena měření relativně heterogenního souboru zlomových struktur a střížných puklin: (i) Jako nejvýraznější se jeví systém S-J až SV-JZ struktur upadajících pod strmými úhly k Z až SZ. Tyto plochy nesou nevýrazné striace upadající pod mírnými úhly k SV a JZ. Prokazatelná kinematika v tomto případě nebyla zjištěna. (ii) Méně výrazným systémem struktur s pohybovými indikátory jsou plochy upadající pod strmými úhly k JJZ až JZ s dobře vyvinutými striacemi subhorizontální orientace i převažujícími indikátory pravostranné kinematiky. Minerální výplň těchto struktur nebyla v rámci studovaných lokalit pozorována. (iii) Poslední skupinu tvoří subvertikální ~V-Z struktury, které často nesou subhorizontální striace upadající k V nebo Z.

Horninový komplex Lhenické zóny (LHZ) je porušen strmě orientovanými zlomovými strukturami a střížnými puklinami ve třech výrazných směrech: (i) SSV-JJZ až SV-JZ průběhu s výskytem striací s mírným úklonem k SSV až SV, bez prokazatelných kinematických indikátorů; (ii) V-Z průběhu s variabilním výskytem striací a kinematického záznamu. Identifikované struktury opět nevykazují výrazné -minerální výplně a (iii) SZ-JV průběhu s výskytem striací subhorizontální orientace a převažujícími indikátory pravostranné kinematiky.

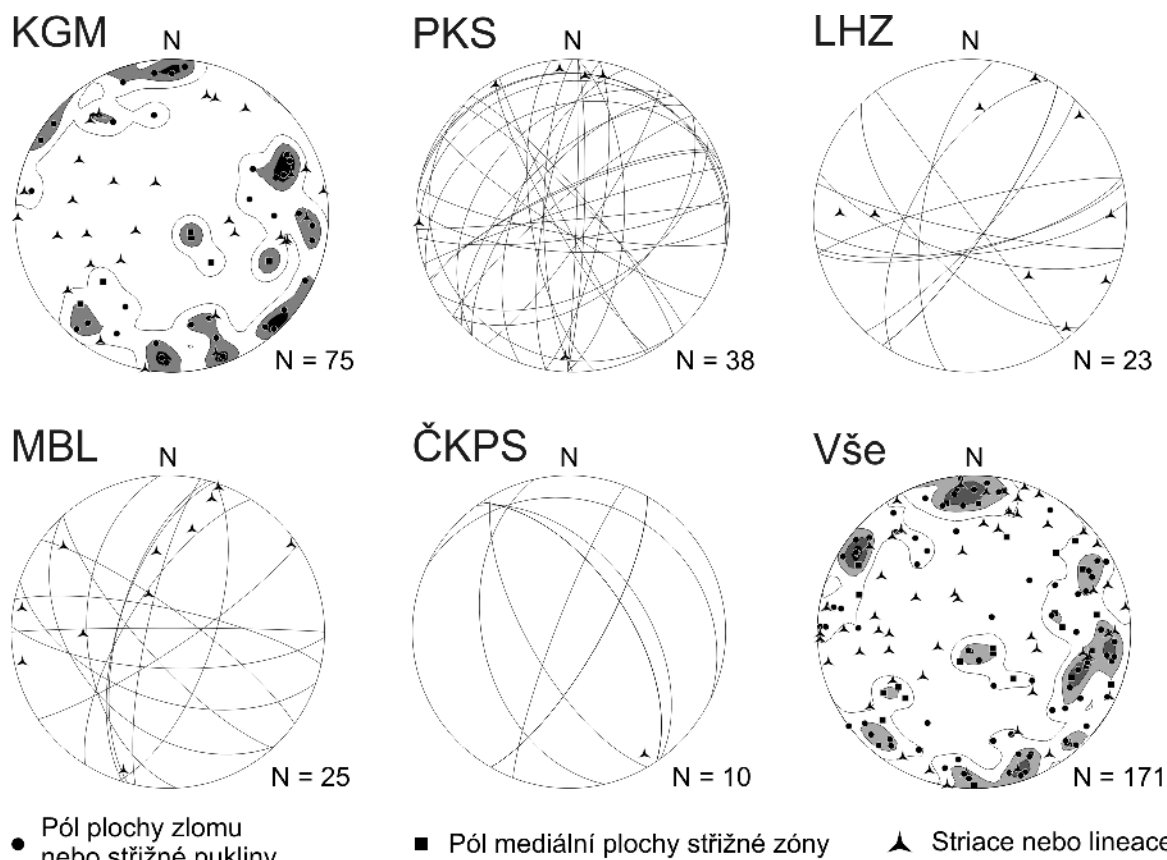


Obr. 10 Zjednodušená geologická mapa širšího polygonu s vnesenými indiciemi křehkého porušení kategorie 2. a 3. a tektonickými značkami terénních měření zlomových struktur. Žlutá linie vyznačuje navrhovaný průběh geofyzikálního profilu, zelená linie ohraničuje území VU Boletce, dále je vyznačeno území širšího zájmu (větší, černě ohraničený obdélník) a vymezené území (menší, černě ohraničený nepravidelný polygon).

V jihozápadní části masivu Blanského lesa (MBL) byly identifikovány dva systémy příslušných struktur. Jako dominantní se jeví zlomové struktury upadající pod strmými úhly k ZSZ s více variabilní orientací striací a asociované kinematiky. Druhý systém zahrnuje více heterogenní soubor zlomových struktur upadající pod strmými úhly k SSV až S a pod strmými až středními úhly k JJZ až J. Striace mají v tomto případě subhorizontální orientaci se záznamem pravostranné kinematiky.

V jednotce Českokrumlovské pestré skupiny (s výskytem mimo užší zájmový polygon) bylo analyzováno jen velmi malé množství křehkých struktur a to bez výrazné přednostní orientace.

V generalizovaném měřítku, napříč vymezenými jednotkami v oblasti zájmového polygonu byly pozorovány tři hlavní směry křehkého porušení s pohybovými indikátory: (i) Plochy upadající pod strmými úhly k ~ZSZ až Z se striacemi více variabilní orientace a kinematiky; (ii) Zlomy a střížné pukliny upadající pod strmými až středními úhly k severu; (iii) Poslední skupinou jsou křehké struktury mající strmou orientaci v průběhu ~ ZSZ-VJV až SZ-JV. Tyto plochy nesou výrazné striace subhorizontální orientace s převažujícími indikátory pravostranné kinematiky.



Obr. 11 Projekce ploch zlomů, střížných puklin a střížných zón zjištěných terénním průzkumem rozdělené dle jednotlivých geologických jednotek (zkratky viz text). Poslední projekce zobrazuje tyto struktury z území celého širšího polygonu.

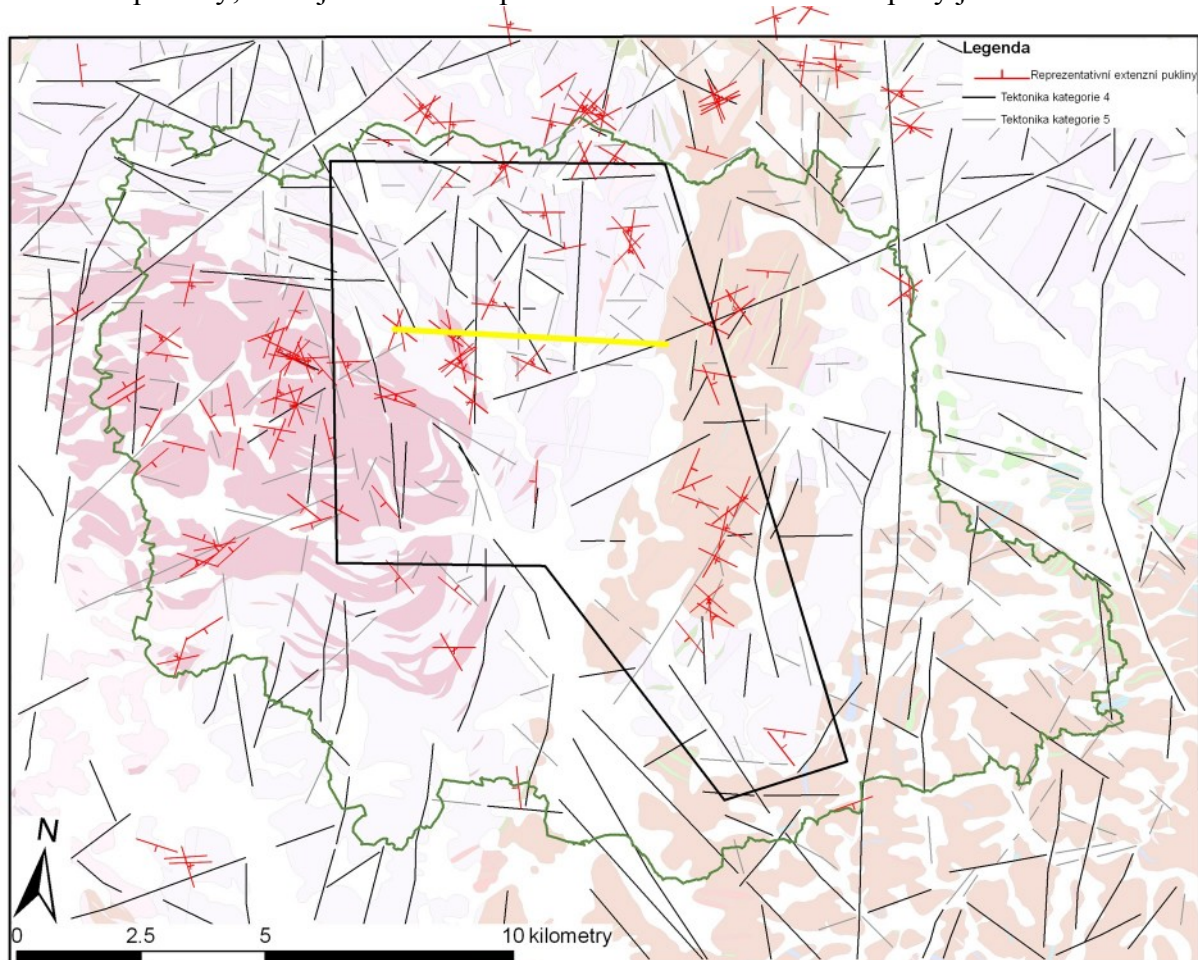
### Extenzní pukliny

Dominantním souborem extenzních puklin (módu I) v horninách celé oblasti jsou subvertikální pukliny bez minerální výplně (Obr. 13, 14). Exfoliační pukliny, často vázané jen na přípovrchové partie horninových komplexů byly až na některé sporné případy z interpretací vyloučeny.

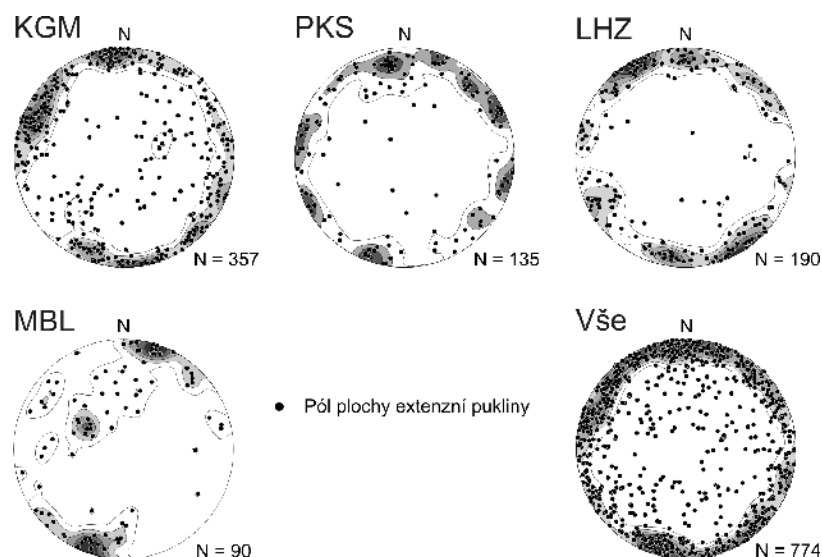
V území širšího zájmového polygonu je možné napříč definovanými jednotkami pozorovat několik hlavních trendů v orientaci strmých extenzních puklin (i) ~SSV-JJZ, až ~SV-JZ, (ii) ZSZ-VJV až SZ-JV a (iii) VSV-ZJZ až V-Z. Výrazné rozdíly v orientaci těchto hlavních populací puklinových systémů granitoidních těles (plutonu Knížecího Stolce) a okolních metamorfovaných hornin moldanubika – KGM a LHZ nebyly pozorovány. Výjimku představují jen granuly Blanského lesa, ve kterých jsou výrazněji zastoupeny pouze extenzní pukliny směru a orientace ad. (ii) ZSZ-VJV, zatímco další dva zmíněné systémy téměř zcela chybí. Naopak zde přistupuje nový, středně k VJV ukloněný systém puklin. V oblasti ČKPS, která do zájmového polygonu zasahuje pouze okrajově, nebylo získáno srovnatelné množství dat puklinového porušení.

Jednotlivé populace puklinových struktur v rámci širšího polygonu vykazují rozdíly v hustotě výskytu. Zatímco na SZ studovaného území dominuje SSV-JJZ směr a další dva vyznačené směry mají jen druhořadý význam, ve východní části kromě SSV-JJZ nabývá na významu také V-Z směr. Dále na východ již V-Z až VSV-ZJZ systém zcela převažuje a SSV-ZJZ

orientace puklin se téměř vytrácí. Na východě oblasti představují jediný dominantní systém ZSZ-VJV pukliny, které jsou ve všech předchozích doménách zastoupeny jen menší měrou.



Obr. 12 Zjednodušená geologická mapa širšího polygonu s vynesnými indiciemi křehkého porušení kategorie 4. a 5. a tektonickými značkami terénních měření dominantních směrů extenzních puklin. Žlutá linie vyznačuje navrhovaný průběh geofyzikálního profilu, zelená linie ohraničuje území VÚ Boletce, dále je vyznačeno území širšího zájmu (větší, černě ohraničený obdélník) a vymezené území (menší, černě ohraničený nepravidelný polygon).



Obr. 13 Konturované pólové projekce ploch extenzních puklin zjištěných terénním průzkumem rozdělené dle jednotlivých geologických jednotek (zkratky viz. text). Poslední projekce zobrazuje extenzní pukliny z území celého širšího polygonu.

#### 4.2.2 Strukturní interpretace

Na základě dokumentovaných struktur a v kombinaci s dosavadní literaturou (viz kapitola 1.) je strukturní vývoj na území VÚ Boletice interpretován jako polyfázový a začíná v období variských orogenních procesů. Pokud pomineme vzácné relikty starších duktilních staveb, pak v první fázi se jedná o tvorbu deformačních staveb  $S_1$  (strmé stavby subkoncentrické orientace) v granulitech KGM a GBL, která pravděpodobně souvisí s výzdvihem granulitů do podmínek střední kontinentální kůry – pararul a migmatitů moldanubika. Během exhumace dochází k částečné retrográdní přeměně původních granulitů. Tvorba superponovaných deformačních staveb  $S_2$  (tvorba regionální metamorfní stavby subhorizontální orientace) pak souvisí s vertikálním zkracováním během kolapsu variského orogenního kořene (v podmínkách  $T: 765 \pm 53^\circ\text{C}$  a  $P: 7,5 \pm 1,6 \text{ Kbar}$ , Verner et al. 2008) a je doprovázena další fází retrográdní přeměny. Během tohoto deformačního eventů do komplexu metamorfovaných hornin syntektonicky intrudují durbachity plutonu Knížecího stolce ( $340 \pm 8,2 \text{ Ma}$ , Verner et al. 2008).

Během výstupu, chladnutí a přechodu od duktilního ke křehkému chování těchto hornin docházelo během pokračujících variských deformací ke vzniku lokalizovaných střížných zón a iniciálních křehkých struktur v generelu více variabilní orientace. Tyto zóny byly místy vyplněny žilami granitoidního složení, dosahujících obvykle centimetrových až decimetrových mocností

Zlomové struktury představují převážně plochy (i) SSV-JJZ směru, patrné jak ze starších mapových podkladů uranového průzkumu, tak z terénních měření. Jedná se o regionálně významný systém zlomů v orientaci Blanické brázd a Rodelského zlomového pásma, od kterých se v rámci studované oblasti odklánějí v řádu  $10\text{--}20^\circ$ . (ii) Druhý výrazný systém strmých zlomových struktur V-Z orientace indikovaný zejména ve výstupech DPZ je též významně podpořen terénními daty. Tyto struktury nemají genetickou souvislost se žádnou z významných zlomových struktur v širším okolí zájmového polygonu a mají tudíž pouze lokální a z tektonického hlediska minoritní význam. (iii) Třetí systém tvoří křehké struktury

SZ-JV směru, které geneticky souvisí s pravostranným horizontálním posunem podél shodně orientovaných zlomových zón v Bavorské části moldanubika. Uvažované křehké struktury ~S-J průběhu, paralelní s předpokládaným lhenickým zlomovým pásmem, nemají navzdory indikacím v DPZ i geofyzikálních datech výraznější oporu v terénních pozorováních zlomů. Velká část identifikovaných zlomových struktur byla pravděpodobně v mladším (postvariském) období polyfázově reaktivována. Na mladší aktivitu ukazují změny v paleomorfologii dokumentovaných mesozoickým a terciárním vývojem českobudějovické pánve a horského pásma Šumavy.

## 5 Syntéza

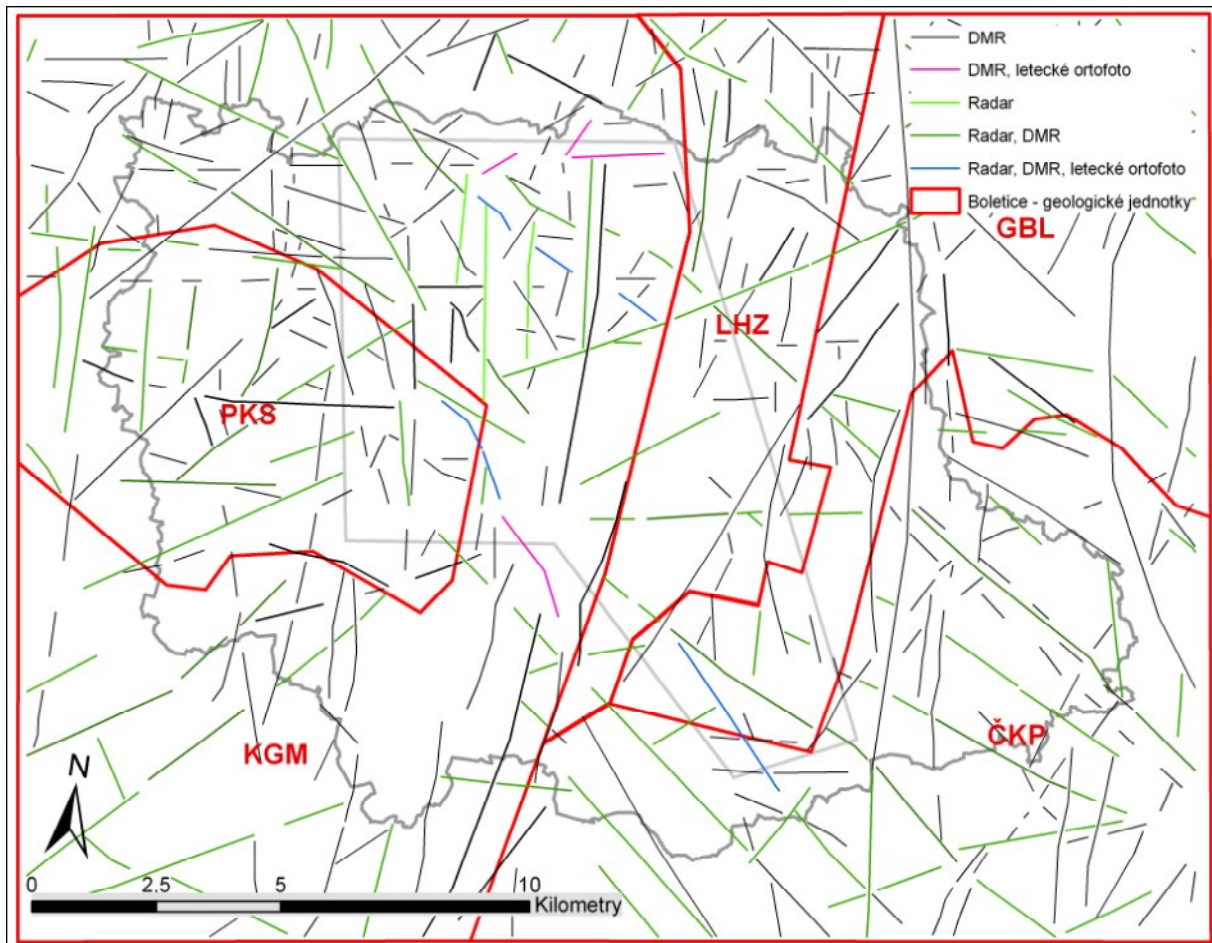
Tato studie integruje interpretaci distančních dat (družicové a letecké snímky, digitální model reliéfu a letecká geofyzikální data) s terénními strukturálními měřeními, které pořídili pracovníci ČGS v posledních letech v zájmové oblasti. V distančních datech je vidět širší strukturální a geomorfologický kontext, problematické zůstává určení charakteru lineárních strukturálních indicií. U většiny takto interpretovaných linií nelze jednoznačně určit, zda se jedná o puklinové systémy, zlomy, střížné zóny a bez detailního terénního mapování mohou interpretované linie reprezentovat i litologická rozhraní (např. žíly a žilníky), která nejsou vymapovaná v dostupných mapových podkladech. Naproti tomu terénní strukturální měření, jako jediná přímá metoda, přinášejí jednoznačný doklad strukturálního prvku (zda se jedná o foliaci, zlom, puklinu, střížnou puklinu, střížnou zónu, apod.). Problematickým bodem zde však zůstává, že dokumentuje jednotlivé výchozy, v omezeně odkrytém terénu bez širšího kontextu, s omezenou možností vyhodnotit význam a regionální rozsah struktur. Jedná se tedy pouze o bodové informace, které nemusí mít díky zakrytosti a neprůchodnosti terénu ideální plošný rozptyl. Některé výrazné zlomové zóny v takovémto terénu mohou díky výraznější erozi drcených zón tvořit deprese zakryté kvarténními sedimenty a nemusí být ani částečně odkryté na výchozech. Naopak některé strukturální fenomény malých měřítek dokumentované na výchozech se nemusí výrazněji projevit v distančních datech. Integrace obou přístupů umožňuje využití výhod obou metod na jedné straně a na druhé straně eliminovat jejich omezenou vypovídací schopnost.

### 5.1 Syntéza výsledků distančních dat (družicové snímky, letecké snímky a letecká geofyzika)

Lineární strukturální indicie interpretované z dat DPZ byly konfrontovány s výstupy letecké geofyziky (Miligal 2009), pokud příslušné indicie korespondovaly s geofyzikálním rozhraním identifikovaným v jednotlivých tematických geofyzikálních mapách (letecká magnetometrie, gravimetrie), byla tato informace přidána do atributové tabulky (**obr. 15**). Dále byla přidána i rozhraní, která nebyla interpretována v DPZ datech (**obr. 15**).

Lineární strukturální indicie interpretované z radarových snímků vykazují značnou shodu s vizuální interpretací DMR. V mapě na **obr. 14** je vidět odlišná míra detailu, radarová data s hrubším rozlišením (pixel 12,5 m) nemohou zachytit menší struktury, které jsou naopak dobře patrné ve velmi detailním modelu reliéfu (pixel 2,5 m). Proto velká část struktur vymapovaných v DMR není potvrzena v radarových datech. Na druhou stranu je nutno podotknout, že tyto drobné struktury identifikované v DMR nebyly většinou identifikovány ani v datech letecké geofyziky (**obr. 15**), ani v terénních datech a byly tudíž zařazeny do kategorie 4 a 5 (**obr. 16**). Větší míra shody indikací interpretovaných z radaru a DMR je v oblastech s málo členitým reliéfem (durbachity a granulity geologické domény PKS a KGM), naproti tomu ve lhenické zóně a dalších výrazně členitějších oblastech (geologická doména LHZ a ČKP) je shoda podstatně menší. V tomto případě se však jedná převážně o

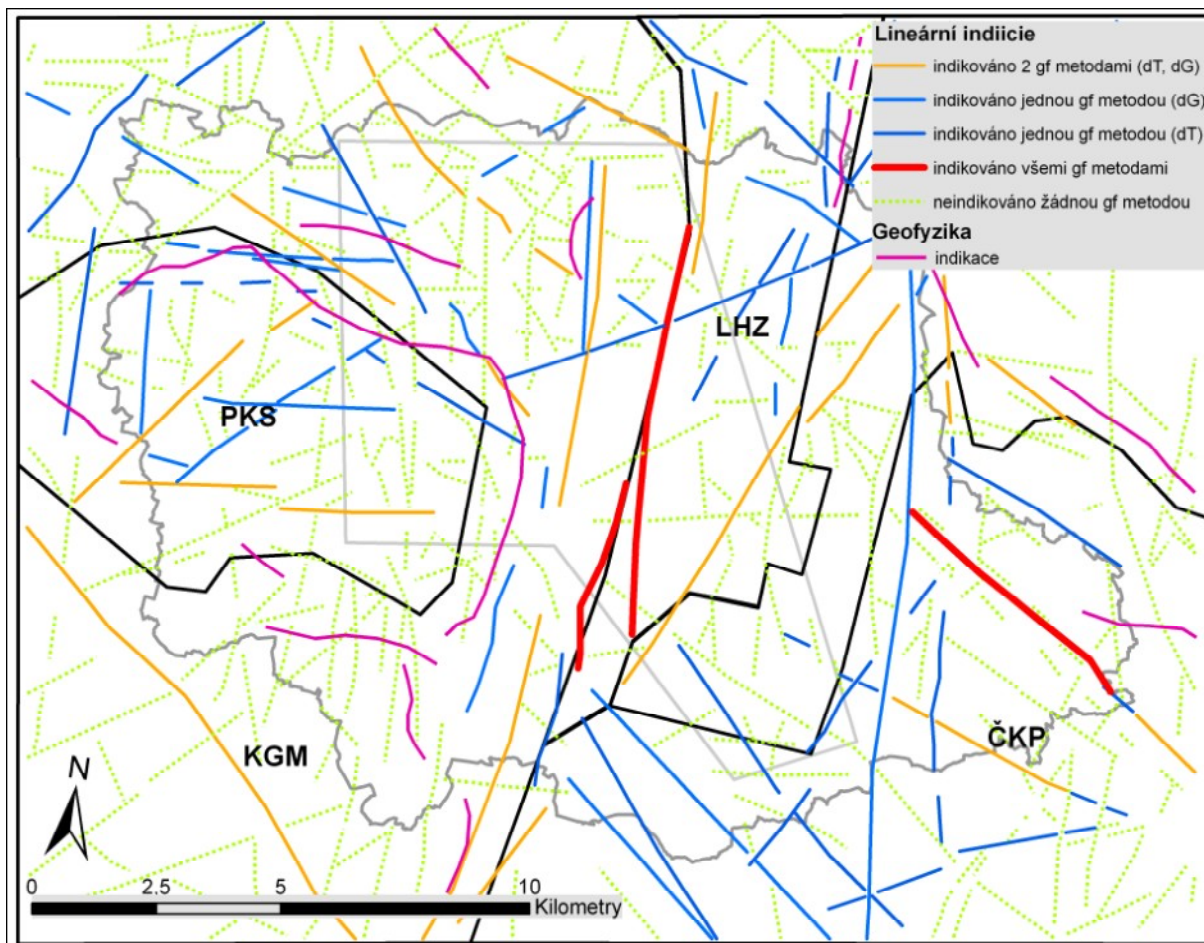
strukturní indicie, které nebyly potvrzeny metodami letecké geofyziky, spadající do kategorie 4 a 5 (Woller 2009, kap. 5.2).



Obr. 14 Mapa lineárních strukturních indikací interpretovaných z DPZ dat ukazuje přínos jednotlivých metod. Značná část indikací vymapovaných z DMR byla potvrzena i v radarových snímcích. Vyznačeny jsou také hranice geologických jednotek/domén diskutované v textu.

Letecká geofyzikální měření prokázala shodu s indiciemi DPZ u hlavních struktur lhenické zóny (ssv. struktury, geologická doména LHZ) a mnohými strukturami sz. směrů (geologická doména PKS, KGM a GBL). Velmi zajímavá je shoda v případě ssv. a v.-z. struktur v doméně LHZ a KGM. Původně byly tyto struktury považovány za málo významné puklinové systémy případně zlomy s malým přemístěním. Vzhledem k tomu, že se projevují jako významná rozhraní v tíhovém poli, jedná se pravděpodobně o hlouběji založené struktury nebo významná litologická rozhraní. V mapě na **obr. 15** jsou také vyznačena rozhraní v tíhovém poli, která nebyla interpretována v DPZ datech (Geofyzika: indicie). S výjimkou hranice durbachitu a granulitu, kde jde o litologickou hranici, se jedná velmi pravděpodobně o struktury založené v hlubších korových partiích, patrně starší zlomy, které nebyly reaktivovány neotektonicky.





Obr. 15 Lineární strukturální indície interpretované z DPZ dat a jejich korelace s leteckými geofyzikálními daty, některá rozhraní indikovaná gravimetrií nebyla interpretována v DPZ datech (geofyzika\_indície). Vyznačeny jsou také hranice geologických jednotek/domén diskutované v textu.

## 5.2 Validace distančních metod s výsledky terénní strukturální analýzy

### Klasifikace indikací liniových struktur křehkého porušení

Na základě dostupného datového souboru:

- Přehledu mapované zlomové sítě v měřítku 1:50.000 (Česká geologická služba a Diamo a. s.) a generální mapy ČM 1:500.000 (ČGS),
- Indikací geofyzikálního průzkumu (letecké geofyziky; Miligal s.r.o.),
- Analýzy distančních dat dálkového průzkumu Země (Česká geologická služba)
- Výsledků mezoskopické strukturální analýzy křehké a duktilní tektoniky (Česká geologická služba)

a míry relevance výše uvedených datových zdrojů ve vztahu k posouzení křehkého porušení a duktilní anizotropie horninového komplexu byly definovány základní požadavky na liniové strukturální indície, které budou zohledněny ve vrstvě multikriteriální analýzy:

(i) Všechny struktury křehké tektoniky převzaté z dostupných základních geologických map měřítka 1:50.000 (Česká geologická služba a Diamo a. s.) a generalizované mapy 1:500.000.

(ii) Liniové strukturní indicie distančních dat DPZ s jednoznačnou podporou terénního strukturního měření (zlomových struktur, dominantních směrů průběhu a orientace střížných a extenzních puklin).

(iii) Liniové strukturní indicie distančních dat DPZ se shodou indikací geofyzikálního průzkumu (letecké geofyziky).

Datový soubor je dále klasifikován do definovaných kategorií míry křehkého a duktilního porušení (kategorie 1.-7.; Woller 2009). Indicie křehké tektoniky (kategorie 1.-5.) jsou graficky zobrazeny do tektonické vrstvy multikriteriální analýzy (zpracováno v prostředí ArcGIS, viz **obr. 16**). Kategorie zahrnující duktilní anizotropii horninových komplexů (přednostní prostorové orientace minerálů; kategorie 6.-7.) nebyly v multikriteriální analýze zohledněny a to zejména z důvodu absence příslušných geomechanických dat. Tato strukturní terénní data mající význam v rámci podrobnějších etap geologického průzkumu horninového prostředí navrhované lokality jsou prezentována v kapitole 4.2.

Níže je uvedena podrobná definice a členění jednotlivých kategorií struktur křehkého porušení, vycházející z MODIFIKACE METODIKY MULTIKRITERIÁLNÍHO HODNOCENÍ LOKALITY BOLETICE PRO STANOVENÍ NADĚJNOSTI UMÍSTĚNÍ HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ (Woller 2009):

#### **Kategorie 1. Hlubinné zlomy a zóny vyššího řádu**

Nebyly zjištěny

#### **Kategorie 2. Významné zlomy a zóny nadregionálního významu.**

Jedná se o zlomové struktury o výrazné délce (v některých případech přesahující 10 km) nebo o přerušované zlomy, u nichž je pravděpodobná genetická a mechanická vazba s hlubinnými strukturami. Struktury této kategorie bývají doprovázeny výraznými morfologickými projevy, pravděpodobně s velmi mírnou recentní pohybovou aktivitou. Žádná z indikovaných struktur v širším území zájmového polygonu bezvýhradně nespĺňuje kritéria této kategorie. Z důvodu vyšších bezpečnostních nároků byly do této kategorie zařazeny dvě nejvýraznější tektonické linie, z nichž pouze jedna přímo zasahuje do území VÚ Boletice.

#### **Kategorie 3. Zlomy a zóny regionálního významu**

Jedná se o soubor indikací zlomových struktur v souladu s kritérii této kategorie (Woller 2009) a zároveň přesahující v erozním řezu délku ~2 km. Jedná se o struktury převzaté z dostupných geologických map (viz výše) v celkovém počtu 64 liniových indikací a o struktury mající jednoznačné indicie v distančních metodách geologického výzkumu a zároveň ověřené podrobným terénním průzkumem - 44 liniových indikací.

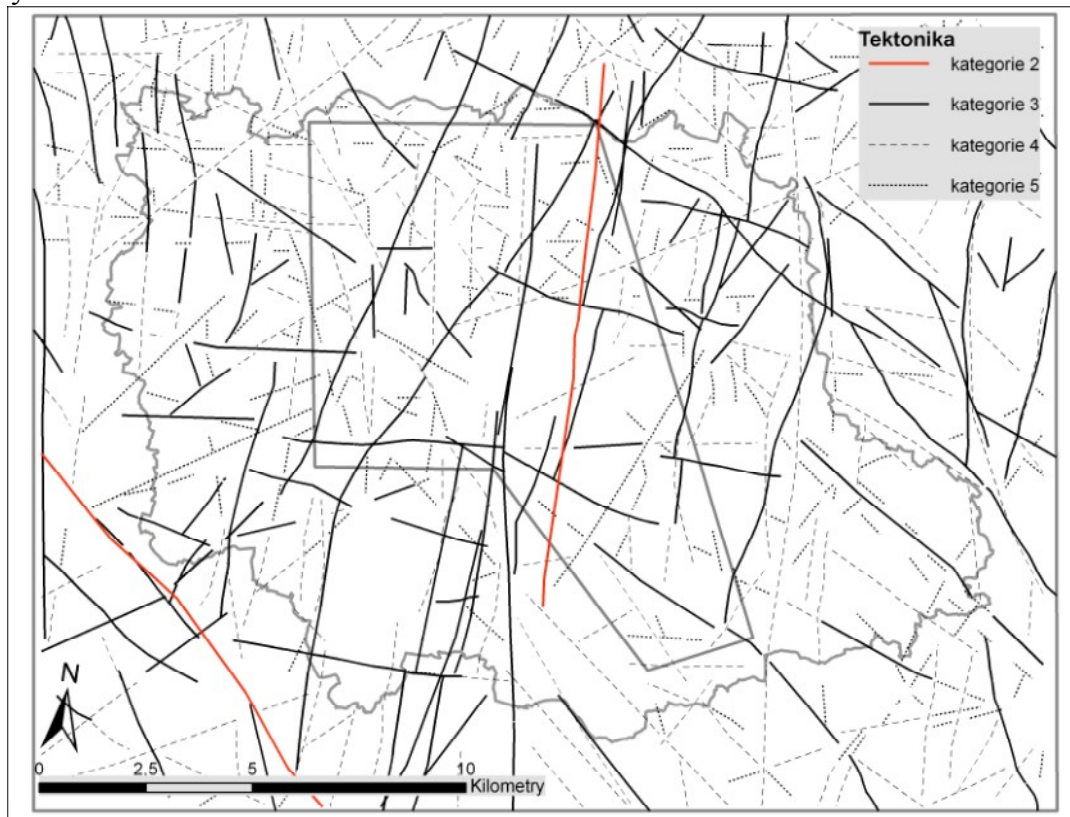
#### **Kategorie 4. Zlomy a zóny nižšího řádu**

Do této kategorie byly zařazeny liniové indicie DPZ s nízkou podporou v distančních metodách geofyzikálního průzkumu (indicie jedné nebo dvou nezávislých geofyzikálních metod) a zároveň bez podpory terénních dat. Jedná se tedy o nejednoznačné indicie, které mohou kromě zlomových struktur zobrazovat také průběhy dominantních puklinových systémů, duktilní anizotropii horninových komplexů (různé typy foliací), přechody

v litologickém složení hornin, dosud nevymapované hranice dílčích horninových typů apod. Z důvodu těchto nejednoznačností nebyla při klasifikaci struktur brána v úvahu jejich předpokládaná délka. Platný metodický pokyn (Woller 2009) klasifikuje do příslušné kategorie č. 4 zlomové struktury nepřesahující délkou v erozním řezu výrazně 1000 m. V tomto případě však nejsou uvažovány indicie jiných geologických elementů zmíněných výše. Z tohoto důvodu byla tedy adekvátně snížena váha DPZ indikací bez podpory v terénních datech.

### **Kategorie 5. Puklinové systémy a zlomy minoritního významu**

Do této kategorie byly zahrnuty terénní indicie puklinových struktur, indicie DPZ bez podpory v geofyzikálních a terénních datech a indicie DPZ s podporou geofyzikálních metod nepřesahující délku 1 km. Ve srovnání délkou stovek metrů uvedenou pro kategorii 5. v kritériích Wollera (2009) je zvolená délka opět několikanásobně vyšší. Mírnější kritérium pro délku podobně jako v případě kategorie 4 vyvažuje mnohoznačnost zařazených indikací. V grafickém vyjádření indikací s kritérii kategorie 4. a 5. pak příslušné rozdíly zohledněny nebyly.



Obr. 16 Indicie křehké tektoniky (kategorie 1.-5.).

### ***Korelace přednostních směrů indikací distančních metod s hlavními směry křehkých struktur ověřených v terénu***

Za účelem kvalitativního posouzení validace výsledků distančních dat (DPZ a provedeného geofyzikálního průzkumu) a výsledků terénní strukturní analýzy prvků křehké tektoniky byly korelovány lineární strukturní indicie křehkého porušení s výsledky terénního strukturního výzkumu. Lineární indicie distančních metod (klasifikované do definovaných kategorií 3. a 4.-5.; metodika klasifikace viz. Woller 2009) byly vyjádřené ve formě růžicových diagramů četnosti v příslušných směrech (viz obr. 17-21) a korelovány terénními daty ve formě

plochojevné projekce mezoskopických křehkých struktur (zlomových a puklinových systémů).

V případě tělesa plutonu Knížecího Stolce (PKS) byla identifikována výrazná korelace terénních dat a indikací křehké tektoniky ve směrech S-J až SSV-JJZ a V-Z až VJV-ZSZ. Terénní strukturní analýza odhalila významnou přítomnost prvků křehkého porušení v průběhu SZ-JV (struktury subparalelní s orientací Pfahlské střížné zóny), které v indikacích distančních metod zcela chybí.

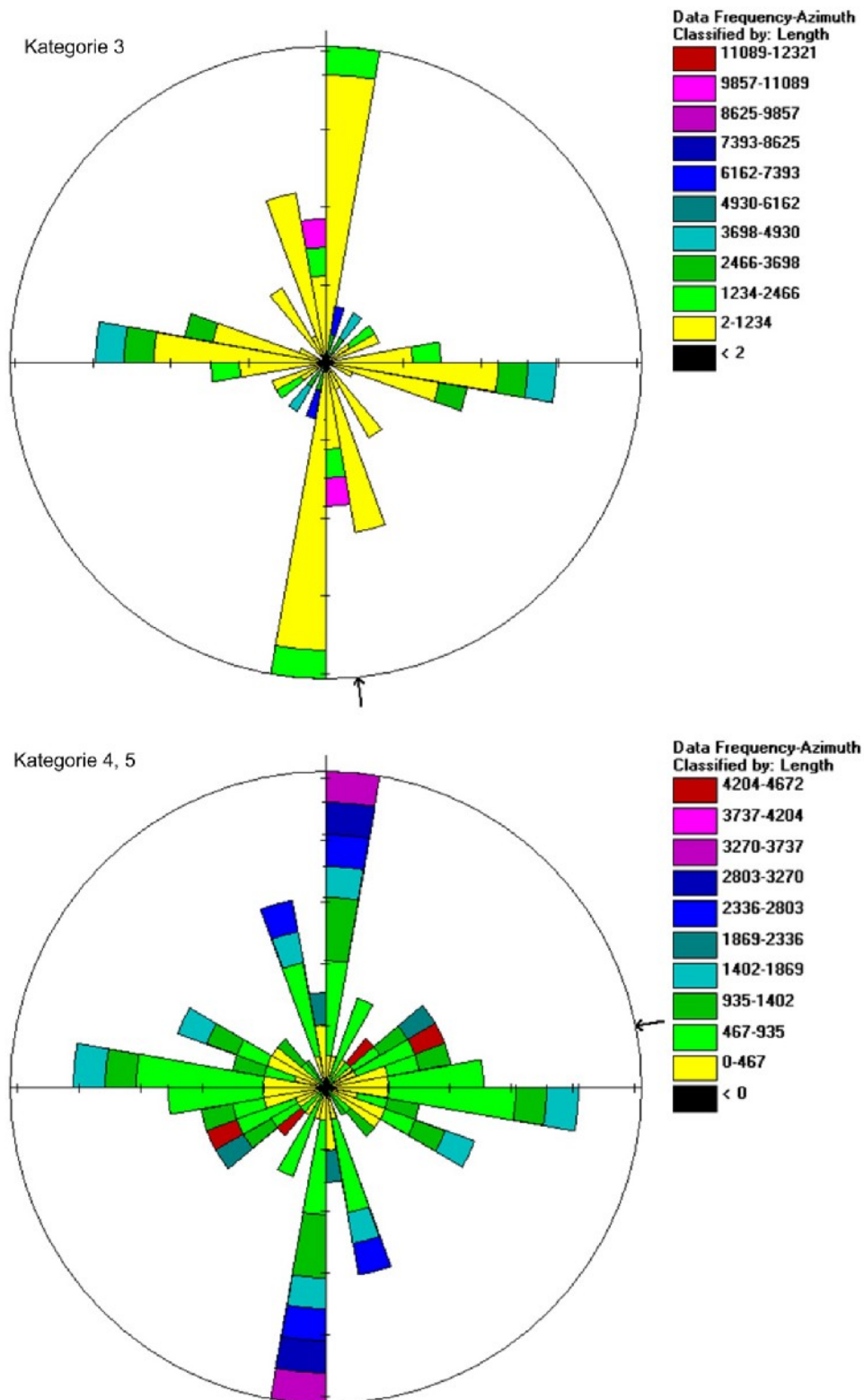
V oblasti tělesa křišťanovského granulitového masivu (KGM) se nejvýraznější směr distančních indikací projevuje relativně širokým maximem v průběhu SSZ-JJV až SSV-JJZ. Tyto indicie odpovídají orientaci skupině výraznějších maxim měřených zlomových struktur a zároveň velmi výraznému maximu měřených extenzních puklin. Indicie minoritního výskytu mají rozptýl SV-JZ, V-Z až SZ-JV se zjištěnou podporou v terénním průzkumu a to jak v orientaci zlomových tak puklinových struktur. Mezi další směry ověřené terénním průzkumem patří SSV-JJZ orientace s dílčími submaximy VJV-ZSZ a SV-JZ směru.

Horninový komplex Lhenické zóny (LHZ) ukazuje dvě hlavní maxima v průběhu indikací distančních dat a to (i) VSV-ZJZ až JV-SZ a (ii) S-J až SSV-JJZ. Tyto indicie nesou velmi dobrou shodu s měřenými zlomovými strukturami, v případě měřených extenzních puklin byl navíc identifikován jejich výrazný průběh ve směru SV-JZ.

V případě masivu Blanského Lesa (MBL) z důvodu absence výraznější přednostní orientace v průběhu indikací distančních dat prvků kategorie 4. a 5. jsou korelovány pouze indicie kategorie č. 3. V tomto případě byla odhalena dvě výrazná maxima směru ZSZ-VJV a S-J až SSV-JJZ. Tyto indicie velmi dobře odpovídají zlomovým i puklinovým strukturám, které byly identifikovány během terénního průzkumu.

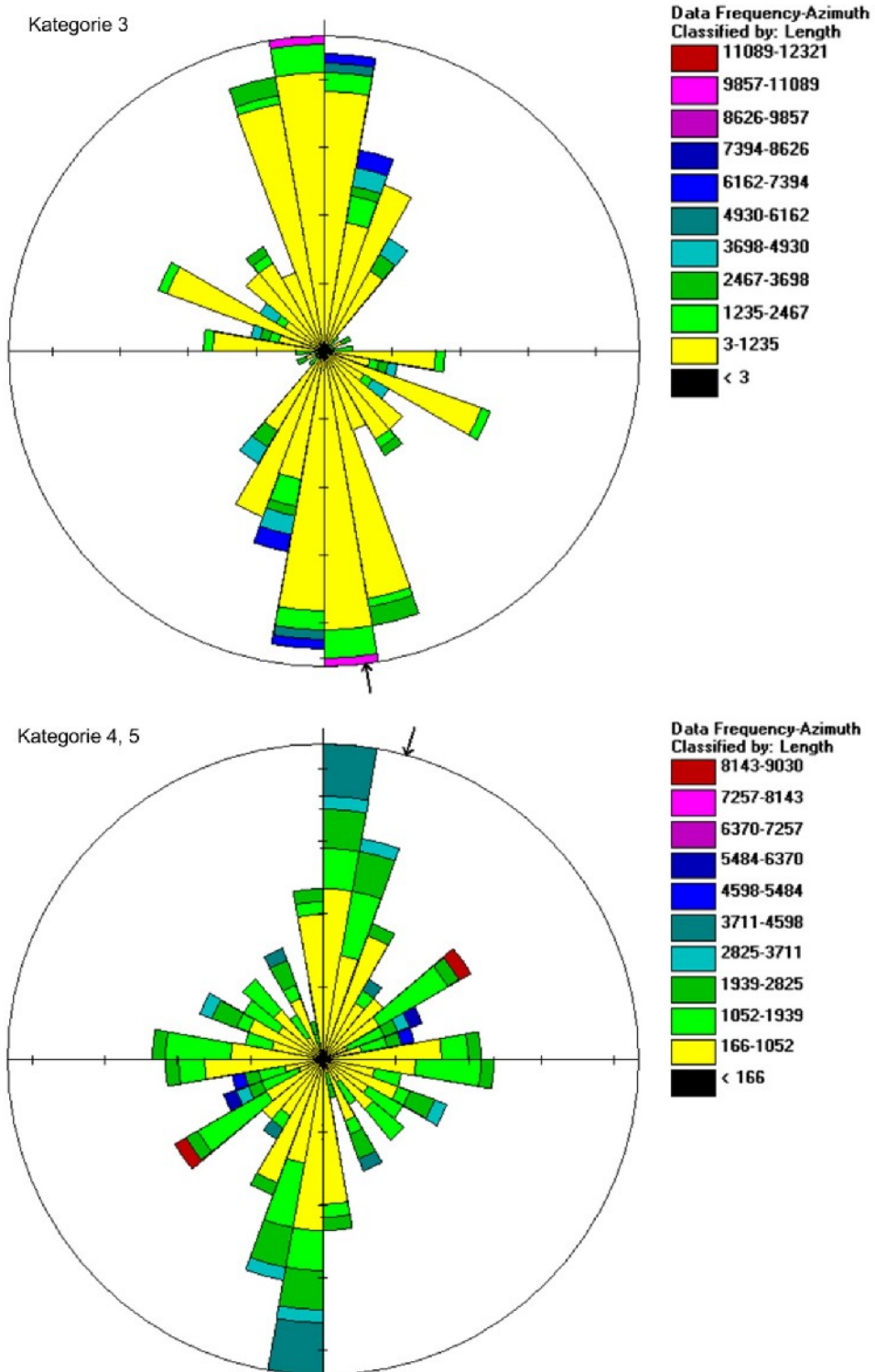
Horniny Českokrumlovské pestré skupiny (ČKPS) v distančních datech ukazují jedno hlavní maximum v orientaci indikací křehkého porušení a to SZ-JV až SSZ-VJV a podřízené maximum v orientaci SSV-JJZ. Tyto indicie dobře korelují s orientací měřených zlomových struktur a střížných zón.

## Durbachitový pluton Knížecího stolce



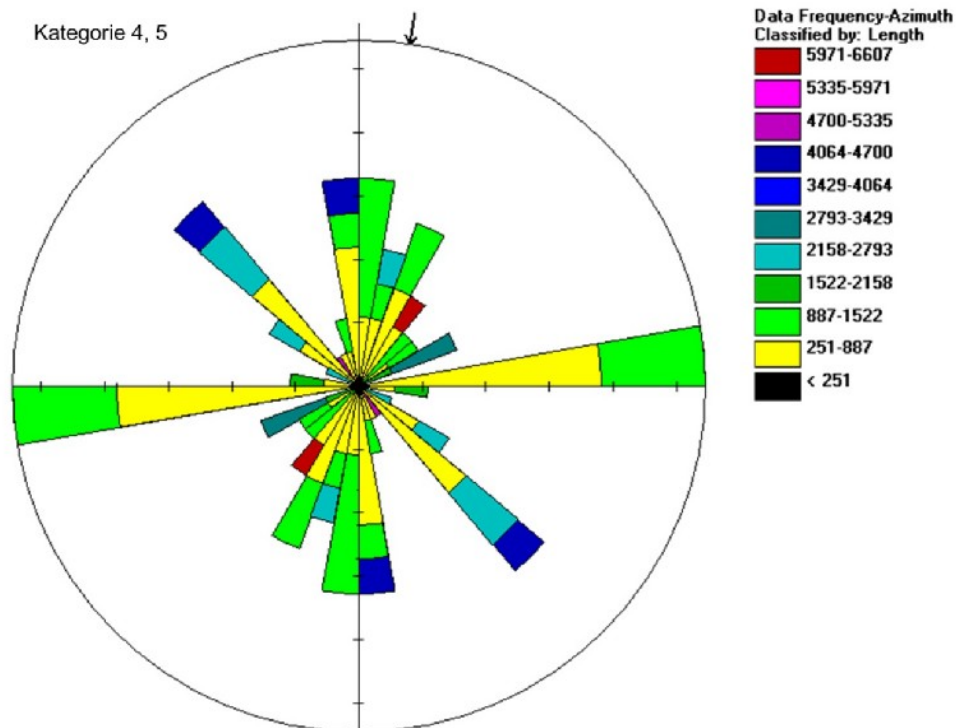
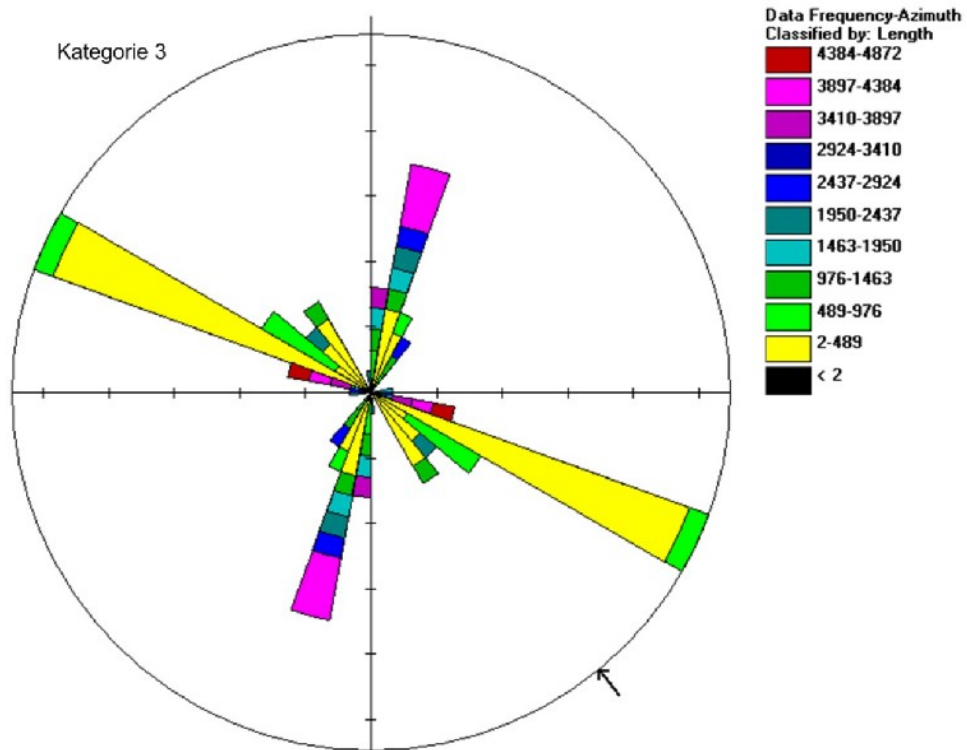
Obr. 17 Růžicové diagramy směrů lineárních indikací z dat DPZ: Durbachitový pluton Knížecího stolce.

## Křišťanovský granulitový masiv



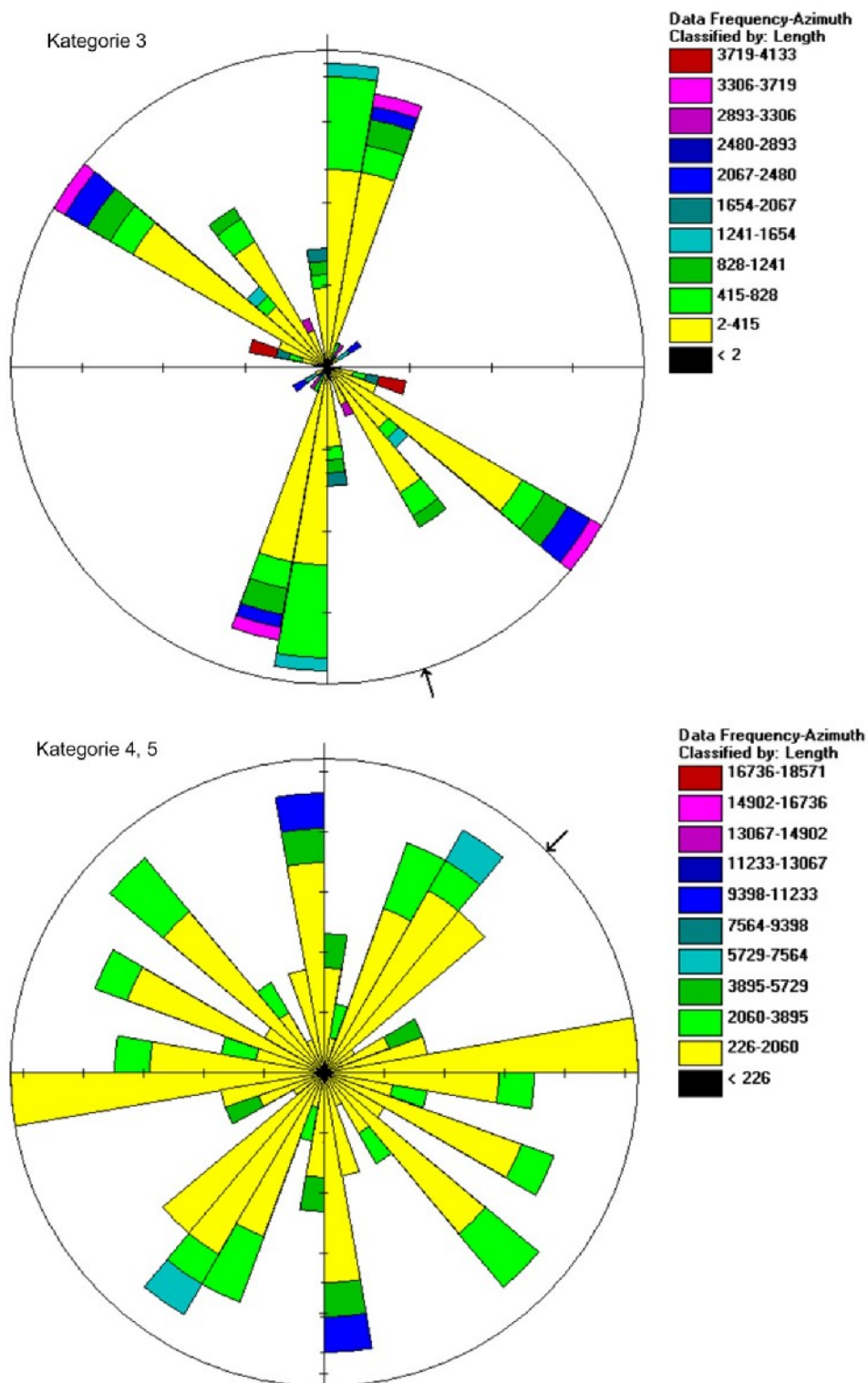
Obr. 18 Růžicové diagramy směrů lineárních indikací z dat DPZ: Křišťanovský granulitový masiv.

### Lhenická zóna



Obr. 19 Růžicové diagramy směrů lineárních indikací z dat DPZ: Lhenická zóna.

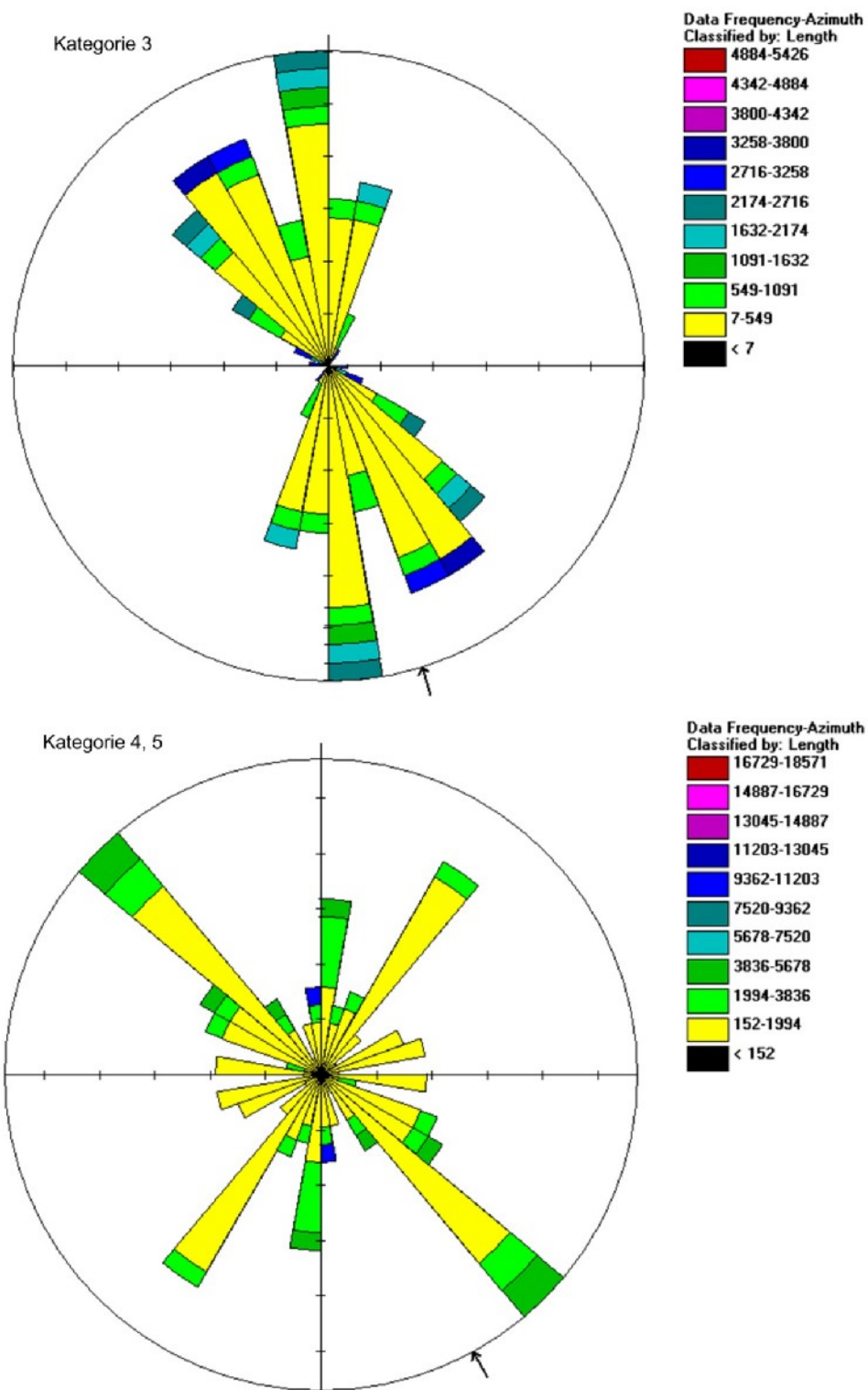
## Granulitový masiv Blanského lesa



Obr. 20 Růžicové diagramy směrů lineárních indikací z dat DPZ: Granulitový masiv Blanského Lesa.



## Českokrumlovská pestrá skupina



Obr. 21 Růžicové diagramy směrů lineárních indikací z dat DPZ: Českokrumlovská pestrá skupina.

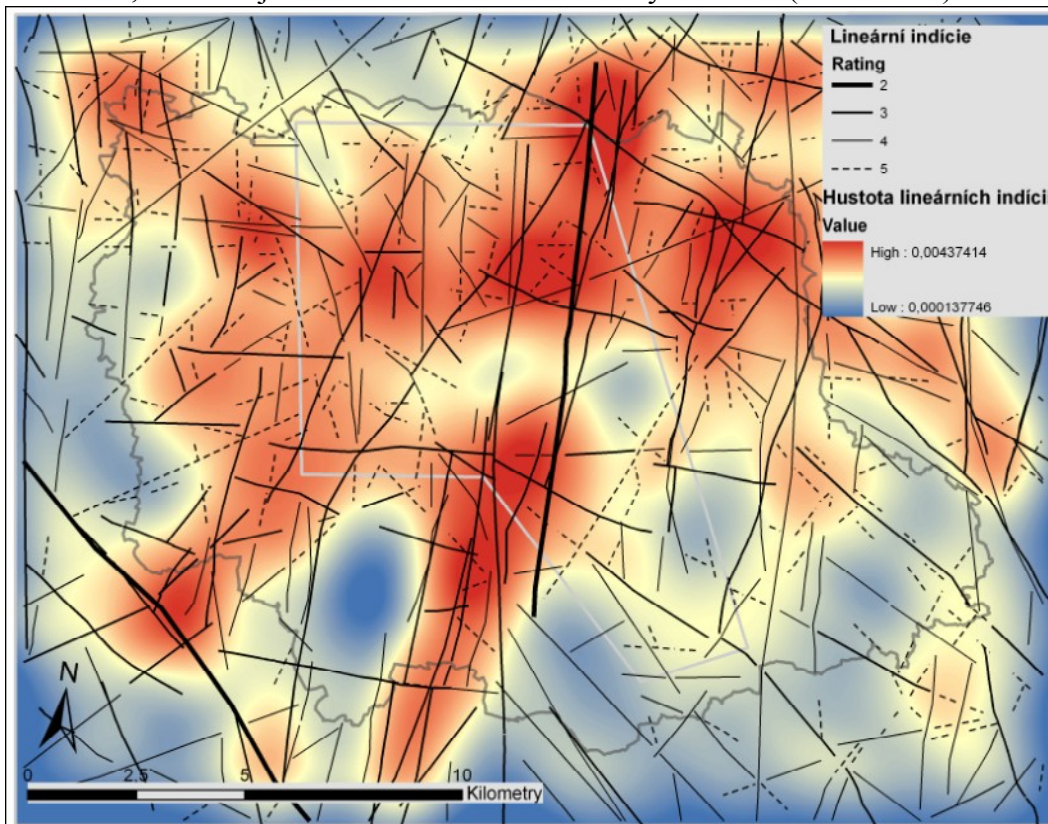
### 5.3 Přínos jednotlivých aplikovaných metod pro tvorbu datové vrstvy „tektonika“ multikriteriální analýzy

Přínos jednotlivých distančních a terénních metod pro stanovení významnosti jednotlivých struktur (kategorie 2 až 5) je detailně diskutován v kapitolách 5.1. a 5.2. Základním datovým zdrojem pro tvorbu vrstvy „tektonika“ pro multikriteriální analýzu byla mapa bufferů (narázníkových/obalových zón) okolo lineárních indikací 2. a 3. řádu. Byla vytvořena v AQUATESTU podle kritérií Wollera (2009). Lineární indicie 2. a 3. řádu byly interpretovány několika distančními metodami, popř. potvrzeny terénním strukturálním výzkumem, a proto reprezentují pravděpodobné kandidáty na významné zlomy či puklinové systémy založené hlouběji v zemské kůře.

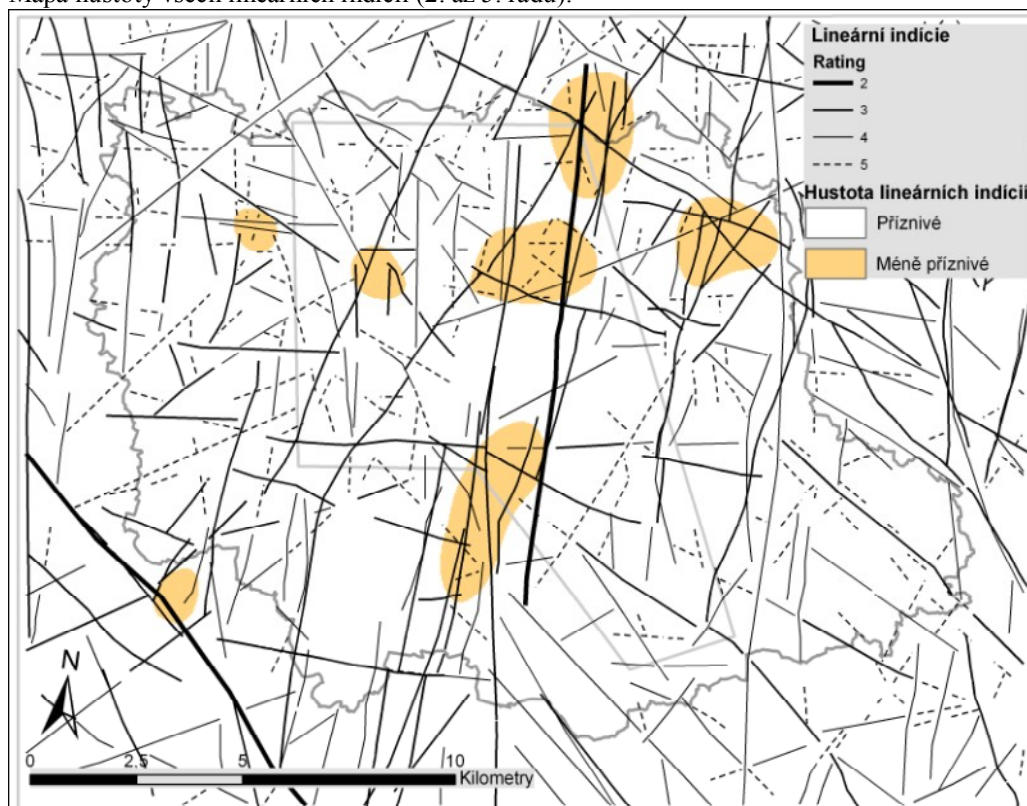
Na rozdíl od lokalit zpracovaných v rámci řešení projektu Geobariéra (Pospíšil et al. 2004) řešitelský tým v případě lokality VÚ Boletice disponuje podrobným souborem terénních dat křehké a duktilní tektoniky, čítající více než 500 zpracovaných výchozových lokalit a zároveň podrobnějšími výstupy analýzy DPZ. Nadstandardní datové výstupy ve spojení s provedenou interpretací letecké geofyziky umožňují podloženou kvantifikaci nejen struktur vyššího řádu (kategorie 2. a 3.), ale také plošné posouzení indikací nižšího řádu (kategorie 4. a 5.). Indicie zlomových struktur spadající do kategorie 2. a 3. byly kvalifikovány jako předpokládané zlomové struktury s příslušnou charakteristikou (Woller 2009) a zhodnocením. Indicie spadající do kategorie 4. a 5. mohou představovat zlomové struktury nižšího řádu nebo průběhy dominantních puklinových systémů, duktilní anizotropie horninových komplexů, přechody v litologickém složení hornin, hranice dílčích horninových typů apod. U struktur 4. a 5. řádu se pravděpodobně jedná o méně významné struktury, jejichž hloubkový dosah nemusí být pro budování hlubinného úložiště významný. Některé významné zlomové systémy se však nemusí projevovat v morfologii ani v distančních datech, zlomové zóny jsou někdy charakterizovány zónami drcení a alterací a mohou v morfologii tvořit nevýznamné deprese bez výchozových partií. V takovém případě nemusí být indikovány jako výrazné lineární struktury a ani nemusí být potvrzeny terénním výzkumem. Mohou se však projevovat nepřímo: v jejich blízkosti, a zvláště na křížení takových struktur, se často vytvářejí systémy drobných konjugovaných puklin a zlomů. Tento fenomén se využívá při mapování lineamentů (Dhakate et al. 2008, Arellano-Baeza et al. 2006, Boyce a Morris 2002, Jordan et al. 2005) a např. v ložiskové prospekci, protože na intersekcích zlomů bývají často alterační zóny se zrudněním (Hutsinpillar 1988). Proto jsme zařadili do hodnocení tektonického porušení také struktury 4. a 5. řádu.

V případě zpracování této sady dat do formy multikriteriální vrstvy (část tektonika) byla provedena statistická analýza prostorové distribuce těchto indikací. Předpokládané struktury vyššího řádu (kategorie 2. a 3.) splňují kritéria nižších kategorií (4. a 5.) a zároveň v případě aplikace distančních metod studia horninového komplexu mohou potlačovat indicie struktur nižšího řádu. Z tohoto důvodu je nezbytné při plošném vyhodnocení indikací kategorie 4. a 5. do výpočtu zahrnout také předpokládané zlomové struktury klasifikované do kategorie 2 a 3. Byl vytvořen grid hustoty lineamentů, při výpočtu byl uvažován poloměr 2 km, četnost výskytu lineamentů byla inverzně vážena vzdáleností a výsledná hustota je přepočtena na km<sup>2</sup> (viz **obr. 23**, Kim et al. 2004, Jordan a Schott 2005, Ekneligoda a Henkel 2006). Tato data mají v celkovém hodnocení tektonického porušení výrazně menší váhu ve srovnání s obalovými zónami kolem linií 2. a 3. řádu. Jako méně příznivé oblasti byly tedy hodnoceny oblasti s poměrně vysokou hustotou ( $\geq 0,0035$ , viz **obr. 24**), těmto poměrně malým

oblastem byla přiřazena stejná váha jako vnější obalové zóně kolem struktur 2. a 3. řádu. Výsledná datová vrstva „tektonika“ ukazující hodnocení z hlediska možného tektonického porušení hornin, vznikla sjednocením těchto dvou datových vrstev (viz **obr. 25**).



Obr. 23 Mapa hustoty všech lineárních indicíí (2. až 5. řádu).



Obr. 24 Měně příznivé oblasti z hlediska hustoty lineárních indicíí (2. až 5. řádu, hustota  $\geq 0,0035$ ).



Obr. 25 Výsledná datová vrstva „Tektonika“ ukazující hodnocení z hlediska možného tektonického porušení hornin.

## 6 Závěry a doporučení

V rámci této studie širšího polygonu zájmového území byly podrobně zhodnoceny výsledky interpretace distančních dat (družicové snímky a letecké stereoskopické snímky, digitální model reliéfu, výsledky letecké geofyziky) spolu s výsledky provedené terénní strukturální analýzy výchozových partií a stávajících geologických map (geologické mapy ČGS a DIAMO a. s.). Dále bylo využito dostupných morfotektonických dat a výsledků analýz neotektonické aktivity širší oblasti zájmového území.

Výše uvedený datový soubor umožnil identifikaci systémů křehkého porušení hornin (puklinových a zlomových systémů) a jejich indikací pomocí integrace všech výše zmíněných metod. Horninové komplexy širšího polygonu zájmového území vykazují relativně nižší indicie křehkého porušení, zejména ve srovnání s jinými krystalinickými oblastmi Českého masivu. Indicie struktur kategorie 1. (dle použité klasifikace; Woller 2009) nebyly v rámci zájmového území identifikovány. V případě struktur kategorie 2. (významné zlomy a zóny nadregionálního významu) se jedná o strukturu Lhenického zlomového pásma S-J průběhu ve východní části širšího polygonu. Druhou strukturou této kategorie je SZ-JV zlomové pásmo, probíhající údolím Lipenské nádrže, jihozápadně od hranice VÚ Boletice. Rozložení struktur kategorie 3. (zlomy a zóny regionálního významu) je v rámci širšího polygonu nerovnoměrné, s vyšší četností v okolí Lhenického zlomového pásma (jižní a východní část širšího polygonu). Směrově pak tyto indicie v převaze odpovídají orientaci S-J (struktury paralelní

s Lhenickým zlomem), dále SSV-JJZ (struktury paralelní s průběhem Rodelského zlomu a Blanické brázdy) a v poslední řadě průběhu SZ-JV (struktury paralelní s průběhem Dunajského zlomu a Pfahlské střížné zóny). Minoritní význam pak mají struktury V-Z směru. Prostorová distribuce minoritních struktur kategorie 4. a 5. je v rámci širšího polygonu nerovnoměrná, generelně vyšší v severní a východní části území. Oblasti výraznějšího výskytu těchto indikací byly lokalizovány zejména mimo průběh významnějších zlomových struktur.

Z hlediska výše uvedené distribuce a charakteru identifikovaných a předpokládaných křehkých struktur vychází jako nejvhodnější území pro navazující geologický průzkum za účelem detailnějšího posouzení vhodnosti horninového prostředí pro vybudování hlubinného úložiště severozápadní a jihozápadní oblast užšího vymezeného polygonu (vymezeného území). S ohledem na litologickou homogenitu horninového prostředí, která byla ověřena během terénního geologického mapování České geologické služby (projekt 390000; J. Pertoldová et al.) se pro daný účel jeví území v severozápadní části užšího polygonu, které je tvořeno monotónní sekvencí felsických retrográdních granolitů.

Doporučení pro další práce:

- Detailní geologické mapování vymezeného území v měřítku 1:10 000 včetně aplikace podpůrných technických prací (mělké mapovací vrty, kopané sondy).
- Komplexní strukturní analýza všech výchozových partií v rámci zájmového území s důrazem na semikvantitativní posouzení křehkého porušení hornin (včetně statistického vyhodnocení získaných dat).
- Aplikace kvantitativních metod strukturní analýzy (anizotropie magnetické susceptibility, identifikace vnitřní prostorové orientace metamorfických a magmatických staveb a jejich intenzity pomocí analýzy difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD), výpočet paleonapětí na strukturách křehkého porušení s pohybovými indikátory).
- Komplexní analýza možných výplní zlomových a puklinových struktur včetně stanovení absolutního stáří pomocí vhodných geochronologických metod.
- Analýza recentní tektonické aktivity na odpovídajících zlomových a puklinových strukturách, zejména pak v úzké součinnosti se znalostmi aktuální orientace a charakteru regionálního napětového pole.
- Podrobná analýza petrologického a chemického složení mapovaných hornin a možných sekundárních alterací (včetně termodynamického modelování teplotně-tlakového vývoje vybraných hornin).
- Aplikace pozemních metod geofyzikálního průzkumu za účelem ověření struktur křehkého porušení identifikovaných terénním geologickým mapováním a strukturní analýzou.
- Analýza geomechanických vlastností všech mapovaných litologií včetně definovaných variet retrográdně metamorfovaných felsických granolitů.

Pro porozumění vývoje reliéfu v zájmovém území a kvalifikované zhodnocení rizik vyplývajících z možných pohybů na vymapovaných zlomech je nezbytné porozumění časovému vývoji paleotopografie a recentní geomorfologie. Změny v morfologii bývají často řízeny pohyby na zlomech. Subrecentní pohyby na zlomových zónách je možno ověřit pomocí seismologické studie zahrnující nová měření v oblasti, pomocí geodetických měření (přesné stanice GPS umístěné v oblasti) a pomocí datování erozních rychlostí. V posledních letech se velmi rozvíjejí nízkoteplotní termochronometrické metody a metody datování expozice reliéfu. Studie by měla zahrnovat jak konvenční metody datování (detailní terénní mapování geomorfologie a kvartérních sedimentů, teras, jejich superpozice a mocností; analýza štěpných stop apatitu a zirkonu), tak i nové techniky jako (U-Th)/He datování apatitu a zirkonu a datování expozice sedimentu (kvartérních teras) pomocí optické luminescence křemene (von Blanckenburg, 2005; Reiners a Brandon, 2006; Farley, 2002).

## Literatura

- Arellano-Baeza A.A., Zverev A.T., Malinnikov V.A., 2006. Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data. *Advances in Space Research*, 37, 690–697.
- Babůrek, J., Pertoldová, J., Verner, K., Jiříčka, J., 2006: Průvodce geologií Šumavy. Správa národního parku a Chráněné krajinné oblasti Šumava a Čes. geol. služba. Praha. 118 str.
- Balatka B., Hrádek M. a Ivan A., 1991. Morfotektonická mapa ČR 1 : 200 000. Geografický ústav ČSAV, pp. 22, archiv ČGS.
- Bárta J., Tesař M., Andersen H. T., 2004. Letecký geofyzikální průzkum. Provedení geologických a dalších prací pro hodnocení a zúžení lokalit pro umístění hlubinného úložiště. Zpráva SÚRAO. Brandmayr M, Dallmeyer R.D., Handler R., Wallbrecher E. (1995). Conjugate shear zones in the Southern Bohemian Massif (Austria): implications for Variscan and Alpine tectonothermal activity. *Tectonophysics*, 248, 1-2, pp. 97-116.
- Berger, A., Kalt, A., 1999: Structures and Melt Fractions as Indicators of Rheology in Cordierite-Bearing Migmatites of the Bayerische Wald (Variscan Belt, Germany). *J. Petrology*, 40, 11, 1699–1719.
- Boyce J.I., Morris W.A., 2002. Basement-controlled faulting of Paleozoic strata in southern Ontario, Canada: new evidence from geophysical lineament mapping. *Tectonophysics*, 353, 151–171.
- Brandmayr M, Dallmeyer R.D., Handler R., Wallbrecher E., 1995. Conjugate shear zones in the Southern Bohemian Massif (Austria): implications for Variscan and Alpine tectonothermal activity. *Tectonophysics*, 248, 1-2, pp. 97-116.
- Bull W.B., 2007. Tectonic Geomorphology of Mountains. A New Approach to Paleoseismology. Blackwell, London, pp. 1 – 316.
- BURBANK W.D. AND ANDERSON R.S., 2001. Tectonic geomorphology. Blackwell, London, pp.1-274.
- Cajz, V., Vokurka, K., Balogh, K., Lang, M., Ulrych, J., 1999. The České Stredohori Mts.: volcanostratigraphy and geochemistry. *GeoLines (Praha)* 9, 21–28.
- Campbell J.B., 1996. Introduction to remote sensing. 2nd ed., Taylor&Francis, London, pp. 1-622.
- Cloetingh, S; Cornu, T; Ziegler, PA, et al., 2006. Neotectonics and intraplate continental topography of the northern Alpine Foreland. *EARTH-SCIENCE REVIEWS*, 74, 3-4, 127-196.
- Čech, V., 1962: Přehledná geologická mapa ČSSR 1 : 200 000 a textové vysvětlivky, list M-33-XVII České Budějovice a list M-33-XXXIII Vyšší Brod. Ústř. Úst. geol. Praha.
- Čopjaková, R., Škoda, R., Pertoldová, J., 2005: Cr-bohaté spinely z ultramafických hornin moldanubika. *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.* Xc, 89–98.

- DAVIS G.H., BUMP A.P., GARCÍA P.E. AND AHLGREN S.G., 1999. Conjugate Riedel deformation band shear zone. *J. Struct. Geol.*, vol. 22, pp. 169-170.
- Dhakate R., Singh V.S., Negi B.C., Chandra S., Ananda Rao V., 2008. Geomorphological and geophysical approach for locating favorable groundwater zones in granitic terrain, Andhra Pradesh, India. *Journal of Environmental Management*, 88, 1373–1383.
- DRURY, S.A., 1997. *Image Interpretation in Geology*. 2<sup>nd</sup> ed.m, Allen & Unwin, Boston, 243pp.
- Ehlen, J., 1999: Fracture characteristics in weathered granites. *Geomorphology* 31 1999 29–45.
- Ekneligoda T.C., Henkel H., 2006. The spacing calculator software—A Visual Basic program to calculate spatial properties of lineaments. *Computers & Geosciences*, 32, 542–553.
- Farley, K.A., 2002, (U-Th)/He dating: Techniques, calibrations, and applications: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 47, p. 819-844.
- Frischbutter, A., Schwab, G., 1995. Karte der rezenten vertikalen Krustenbewegungen in der Umrahmung der Ostsee-Depression. Ein Beitrag zu IGCP.Projekt Nr. 346 “Neogeodynamica Baltica”. *Brandenburgische Geowiss. Beitr.* 2, 59–67.
- GEOČR500, 1998: Atlas map České republiky GeoČR 500. ed. J. Zoubek et al., CD-ROM, Česká geologická služba, Praha.
- Hutsiniller, A., 1988. Discrimination of hydrothermal alteration mineral assemblages at Virginia City, Nevada, using airborne imaging spectrometer. *Remote Sens. Environ.*, 24, 53-66.
- Jakeš, P., 1969: Retrogressive changes of granulite-facies rocks - an example from the Bohemian Massif. *Spec. Publ. Geol. Soc. Australia*, 2, 367–374.
- Janoušek, V., F. Finger, M. Roberts, J. Frýda, C. Pin, and D. Dolejš, 2004: Deciphering the petrogenesis of deeply buried granites: whole-rock geochemical constraints on the origin of largely undepleted felsic granulites from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *T. Roy. Soc. Edin.- Earth.*, 95, 141-159.
- Jordan G., Meijninger B.M.L., van Hinsbergen D.J.J., Meulenkamp J.E., van Dijk P.M., 2005. Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7, 163–182.
- Jordan G., Schott B., 2005. Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. A case study. *Remote Sensing of Environment*, 94, 31–38.
- Kim Gyoo-Bum, Lee Jin-Yong, Lee Kang-Kun, 2004. Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and AvenueTM scripts. *Computers & Geosciences*, 30, 1117–1126.
- Kalt, A., Corfu, F., Wijbrans, J.R.. 2000: Time calibration of a P-T path from a variscan high-temperature low-pressure metamorphic complex (Bayerische wald, Germany), and the detection of inherited monazite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 138,2,143-63.
- Kodym, O., 1963: Přehledná geologická mapa ČSSR 1 : 200 000 a textové vysvětlivky, list M-33-XXVI Strakonice. Ústř. Úst. geol. Praha.
- Kodym, O., 1972: Multiphase deformation in the Blanský les Granulite Massif (South Bohemia), *Krystalinikum*, 9, 91-105.
- Kodym O. (eds.), 1985: Geologická mapa ČSR 1:50 000, list 32-21 Prachatice. Česká geologická služba.
- Kodym O. (eds.). 1990: Geologická mapa ČR 1:50 000, list 32-23 Český Krumlov. Česká geologická služba.

- Kopačková, V., Šebesta, J., 2007: An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation - With a case study in the northern part of El Salvador. In Proceedings of SPIE - Remote Sensing 2007, Vol. 6749 - Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications and Geology. EHLERS, M., MICHEL, U., (Eds), SOCIETY OF PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS – SPIE, (Publ.), Bellingham, USA. Paper No. 6749-105. ISSN 9780819469076. DOI: 10.1117/12.737835.
- Kopecký A., 1972. Hlavní rysy neotektoniky Československa. Sbor. geol. věd, Anthropozoikum, 6, pp. 77 – 155.
- Kopecký A., 1973. Neotektonická mapa ČSSR, 1 : 1 000 000. ÚÚG Praha.
- Kopecký A., 1989. Mapa mladších tektonických struktur Českého masívu 1 : 500 000. ÚÚG Praha, pp. 18.
- Kopecký A., 1983. Neotektonický vývoj a stavba šumavské horské soustavy. Sbor. geol. věd, Anthropozoikum, 15, pp. 71 – 159.
- Kröner, A., O'Brien, P. J., Nemchin, A.A., Pidgeon, R.T., 2000: Zircon ages for high pressure granulites from South Bohemia, Czech Republic, and their connection to Carboniferous high temperature processes. *Contr. Mineral. Petrol.*, 138, 127–142.
- Lobkowicz, M., V. Štědrá, and K. Schulmann, 1996: Late-Variscan extensional collapse of the thickened Moldanubian crust in the southern Bohemia, *Journal of the Czech Geological Society*, 41, 123-138.
- Malkovský, M., 1987. The Mesozoic and Tertiary basins of the Bohemian Massif and their evolution. *Tectonophysics*, 137: 31-42.
- Miligal s.r.o., 2009. Interpretace letecké geofyziky, zpráva samostatně zpracovaná v rámci úkolu Geologické výzkumné práce v části VÚ Boletce k vymezení potenciálně vhodného území pro umístění hlubinného úložiště, zadavatel SÚRAO.
- Miksa, V., Opletal, M., 1996: Soubor geologických a účelových map ČR, Geologická mapa ČR, list 32-14 Nová Pec, měř. 1 : 50 000. Čes. geol. Úst. Kutná Hora.
- Pelc Z. (eds.), 1996: Geologická mapa ČR 1:50 000, list 32-12 Volary. Česká geologická služba.
- Pertoldová J., eds., 2006: Vysvětlivky k základní geologické mapě 23-321 1:Nová Pec. Čes. Geol. Služba. Praha.
- Pospíšil L., Kučera L., Martínek K., Rejl J., 2004. Analýza družicových a leteckých snímků. Provedení geologických a dalších prací pro hodnocení a zúžení lokalit pro umístění hlubinného úložiště. Morfotektonická analýza lokalit. Zpráva SÚRAO.
- Rajchl, M; Ulicny, D; Grygar, R, et al., 2009. Evolution of basin architecture in an incipient continental rift: the Cenozoic Most Basin, Eger Graben (Central Europe). *BASIN RESEARCH*, 21, 3, 269-294.
- Rajlich, P., J. Synek, M. Sarbach, and K. Schulmann, 1986: Hercynian-Thrust Related Shear Zones and Deformation of the Varied Group on the Contact of Granulites, Southern Moldanubian, Bohemian Massif, *Geol. Rundsch.*, 75, 665-683.
- Reiners, P.W., and Brandon, M.T., 2006, Using thermochronology to understand orogenic erosion: *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, v. 34, p. 419-466, doi:10.1146/annurev.earth.34.031405.125202.
- Schenk, V; Schenkova, Z; Jechumtalova, Z, 2009. Geodynamic pattern of the West Bohemia region based on permanent GPS measurements. *STUDIA GEOPHYSICA ET GEODAETICA*. 53, 3, 329-341.
- Stehlík O., Balatka B. et al., 1965. Přehledná geomorfologická mapa západní části ČSSR, 1 : 500 000. Ústřední správa geodézie a kartografie, Praha, archiv ČGS.



- Svojtka, M., J. Kosler, and Z. Venera, 2002: Dating granulite-facies structures and the exhumation of lower crust in the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif, *Int. J. Earth Sci.*, 91, 373-385.
- Suk, M., 1984. Metamorphic history. In: Suk, M. (Editor), *Geological history of the territory of the Czech Socialist Republic*. Academia Publishing House, Prague: 263–288.
- Tanner, D. C., 1999: The scale-invariant nature of migmatite from the Oberpfalz, NE Bavaria and its significance for melt transport. *Tectonophysics*, 302, 3–4, 297–305.
- Tyráček, J., 2001. Upper Cenozoic fluvial history in the Bohemian Massif. *Quat. Int.* 79, 37–53.
- Tyráček, J., Westaway, R., Bridgland, D., 2004. River terraces of the Vltava and Label (Elbe) system. *Proc. Geol. Assoc.* 115, 101–124.
- Urban, M., Synek, J., 1995: Structural Evolution of the Moldanubian Zone. in *Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe*, pp. 429-433. (eds Dallmeyer, R. D., Franke, W. & Weber, K.), Springer, Berlin.
- Verner, K., Pertoldová, J., 2004: Structural and petrological relations among granitoids near Nová Pec (Moldanubian zone). *Geolines*, 17, 98–99.
- Verner, K., Týcová, P., Pertoldová, J., Holub, F. V., 2005: Contribution to understanding the igneous activity during later stages of the Variscan orogeny: Preliminary results of petrological, geochemical and structural study of the Plechý pluton (Moldanubian Batholith, Bohemian Massif). *Geolines*, 18.
- Verner, K., Žák, J., Nahodilová, R., Holub, F. V., 2008: Magmatic fabrics and emplacement of the cone-sheet-bearing Knížecí Stolec durbachite pluton (Moldanubian Unit, Bohemian Massif): implications for mid-crustal reworking of granulitic lower crust in the Central European Variscides. *Int. J. Earth Sci.*, 97 (1), 19-33.
- Verner, K., Žák, J., Pertoldová, J., Šrámek, J., Sedlák, J., Trubač, J., Týcová, P., 2009: Magmatic history and geophysical signature of a post-collisional intrusive center emplaced nearby a crustal-scale shear zone: the Plechý granite pluton (Moldanubian batholith, Bohemian Massif). *International Journal of Earth Sciences* 98, březen, 517-532. ISSN 1437-3254. DOI 10.1007/s00531-007-0285-9.
- von Blanckenburg, F., 2005, The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 237, p. 462-479.
- Vrána, S., 1989: Perpotassic granulites from Southern Bohemia: a new rock - type derived from partial melting of crustal rocks under upper mantle conditions. *Contr. Mineral. Petrol.*, 103, 510–522.
- Vrána, S., 1992: The Moldanubian zone in Southern Bohemia: Polyphase evolution of imbricated crustal and upper mantle segments. – In: Kukul, Z. (ed.): *Proceedings of the 1st Internat. Conf. on the Bohemian Massif*, Prague, Czechoslovakia, 331–336. Čes. geol. úst. Praha.
- Vrána, S., and J. Šrámek, 1999: Geological interpretation of detailed gravity survey of the granulite complex in southern Bohemia and its structure, *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 74, 261- 277.
- Vyskočil P. a Kopecký A., 1974. Recent crustal movements in the Bohemian Massif. *Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický*, Praha, pp. 1-179.
- Westaway, R., 2002. Long-term river terrace sequences: evidence for global increases in surface uplift rates in the Late Pliocene and early Middle Pleistocene caused by flow in the lower continental crust induced by surface processes. *Neth. J. Geosci.* 81, 305–328.
- Woller W., 2006. Provedení geologických a dalších prací pro hodnocení a zúžení lokalit pro umístění hlubinného úložiště. Zkrácená závěrečná zpráva sdružení GEOBARIÉRA. Zpráva SÚRAO.

Ziegler, P.A., 1990. Geological Atlas of Western and Central Europe, 2. Publishing House Bath, 239 pp.

Ziegler, P.A. and Dèzes, P., 2007. Neogene uplift of Variscan Massifs in the Alpine foreland: Timing and controlling mechanisms. *Global and Planetary change*, 58, 1-4, 237-269.