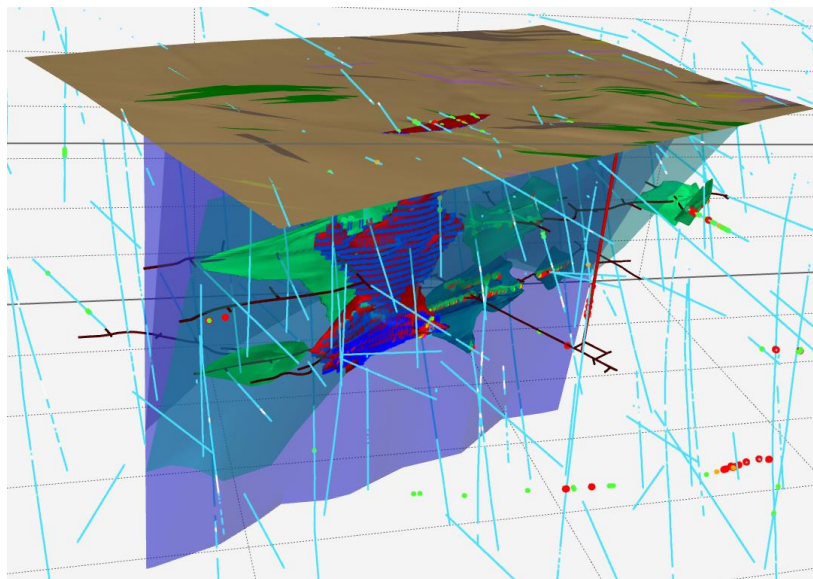


# 3D ložiskově geologický model ložiska uranu Brzkov

Technická zpráva



Jan Jelínek, František Staněk, Radomír Grygar, Jana Staňková

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Česká geologická služba

Praha, březen 2019

# **3D ložiskově geologický model ložiska uranu Brzkov**

## **Technická zpráva**

**Březen 2019**

### **ŘEŠITELÉ:**

<sup>1</sup>Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1

<sup>2</sup>Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172,  
708 33 Ostrava-Poruba

### **AUTOŘI:**

**Jan Jelínek<sup>1</sup>, František Staněk<sup>1,2</sup>, Radomír Grygar<sup>2</sup>, Jana Staňková<sup>2</sup>**

Horní indexy u jmen autorů odkazují na výčet institucí výše.

## Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Geologický popis ložiska uranu Brzkov .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Metodické postupy tvorby 3D modelu ložiska uranu Brzkov .....</b>	<b>9</b>
3.1. Revize, verifikace a korekce vstupních archivních dat .....	9
3.2. Výpočet a vizualizace prostorové lokalizace vstupních dat .....	13
3.3. Konstrukce 3D strukturního modelu .....	13
3.4. Výpočet topologie 3D gridu tělesa uranu podle 3D strukturního modelu .....	18
3.5. Vizualizace technologických parametrů ve 3D .....	20
<b>4. Věrohodnost výsledného modelu .....</b>	<b>22</b>
<b>5. Technické parametry výsledku .....</b>	<b>23</b>
<b>6. Ekonomické parametry výsledku .....</b>	<b>24</b>
<b>7. Závěr .....</b>	<b>25</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>25</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Strukturně-geologické schéma širší oblasti ložiska Brzkov (Ondřík et al., 2014). .....	5
Obr. 2: Strukturně-geologická mapa úseku Brzkov dle podkladů DIAMO. ....	6
Obr. 3: Geologický řez ložiskem Brzkov, úsek Brzkov dle podkladů DIAMO (legenda viz obr. 2). ....	7
Obr. 4: Ukázka tabulky OBJEKT po zpracování bodů 1 a 2. ....	10
Obr. 5: Ukázka tabulky Collars. ....	11
Obr. 6: Lokalizované údaje obsahu uranu v prostředí Voxler. ....	12
Obr. 7: Prostorově usazené patrové mapy ze čtyř výškových úrovní a geologické řezy. ....	13
Obr. 8: Prostorově zobrazená data uranového zrudnění z vrtů a důlních děl rozdělená do 4 tříd. 1. třída 0-10 ppm U (světle modré body), 2. třída 10-100 ppm U (zelené body), 3. třída 100-1 000 ppm U (oranžové body), 4. třída 1 000-200 000 ppm U (červené body). Stanovený zájmový polygon je zobrazen červenou barvou. ....	14
Obr. 9: Pozice vzorků uranového zrudnění (červené křížky), důlní činnosti vymapovaného zrudnění v úrovni 427 m n. m. (oranžová linie), průběh dvou tektonických zón (modré linie) a vytvořených obvodových polygonů dvou modelovaných těles (červené a fialové linie). ....	15
Obr. 10: Pozice vzorků uranového zrudnění tříd 2 – 4, vertikálních a horizontálních důlních děl a deseti modelovaných těles uranového zrudnění. Svým rozsahem největší modelované těleso procházející z povrchu až do hloubky 210 m n. m. je vyznačeno červeně. ....	16
Obr. 11: Pozice po 10 m horizontálně odsazených obvodových polygonů modelovaných těles. ....	17
Obr. 12: Strukturní model zachycující deset modelovaných těles uranového zrudnění, důlní díla a průběhy významných zlomových zón (modré plochy). ....	17
Obr. 13: Obvodové polygony tělesa E uranu vyexportované ze strukturního modelu ve výškových úrovních 220 až 550 (od světle zelené, přes tmavě zelenou, modrou, fialovou, červenou až po černou) s krokem 10 m. ....	18
Obr. 14: Vybrané 10 cm úseky s analýzami uranu uvnitř tělesa. ....	19
Obr. 15: Vizualizace obsahu uranu ve Voxleru modul VolRender. ....	20
Obr. 16: Vizualizace obsahu uranu v prostředí MOVE. ....	21

## Seznam elektronických příloh:

Příloha 1: 3D model lokality ve formátu 3D PDF a projekt v MOVE s MoveViewer pro prohlížení projektu.

## Abstrakt

Tato technická zpráva shrnuje dosud známé geologické poznatky využité pro tvorbu detailního 3D ložiskově geologického modelu ložiska uranu Brzkov. Ve zprávě je popsána obecná charakteristika území 3D ložiskově geologického modelu, regionálně geologický přehled, metodický postup tvorby modelu, věrohodnost výsledného modelu, technické a ekonomické parametry výsledku. Tato technická zpráva a 3D model vznikl v rámci řešení projektu TA ČR TE02000029 - Centrum kompetence efektivní a ekologické těžby nerostných surovin (CEEMIR), jehož hlavním cílem je revize zásob vybraných neenergetických surovin, které se řadí mezi kritické komodity EU. Samotný model je vytvořen v SW MOVE, Surfer a Voxler a předán v nativním formátu MOVE a dále ve formátu 3D PDF.

## Klíčová slova

*3D model, ložisko uranu, kritické komodity EU, Brzkov, Český masiv*

## Abstract

This technical report summarizes the geological knowledge used for construction of a detailed 3D geological model of uranium deposit Brzkov. The report describes the general characteristics of the 3D structural geological model, the regional geological survey, the methodology of creating the model, the veracity of the resulting model, the technic and economic parameters of the result are verbally evaluated. The technical report and 3D model were created within the project TE02000029 Competence Centre for Effective and Ecological Mining of Mineral Resources, granted by The Technology Agency of the Czech Republic. The main objective is a review of reserves of selected non-energy minerals belonging to EU critical commodities. The model is created in SW MOVE, Surfer and Voxler and is transmitted in native MOVE format and in 3D PDF format.

## Keywords

*3D model, uranium deposit, EU critical commodities, Brzkov, Bohemian Massif*

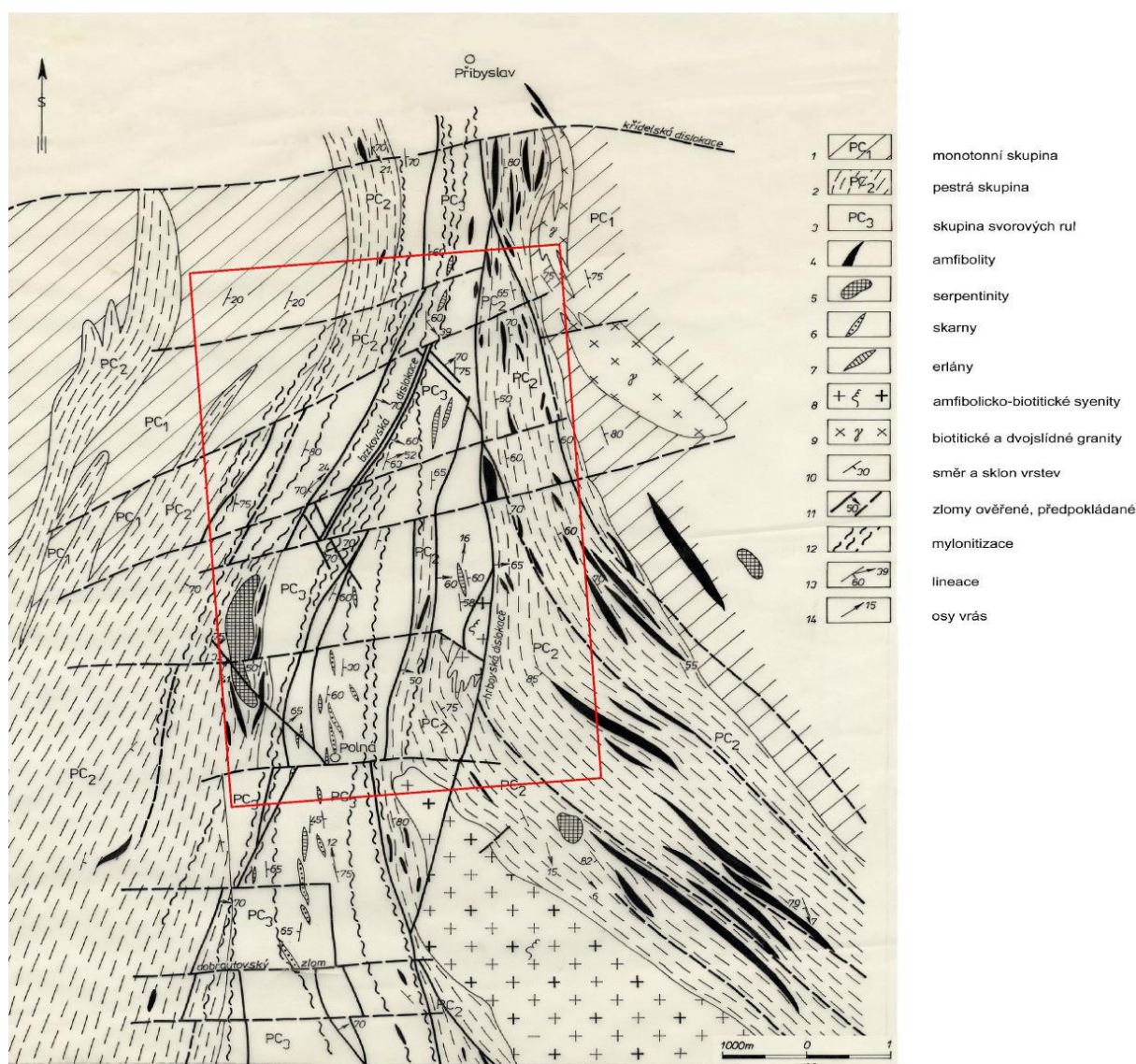
## 1. Úvod

3D ložiskově geologický model ložiska uranu Brzkov vznikl v rámci řešení projektu TA ČR TE02000029 - Centrum kompetence efektivní a ekologické těžby nerostných surovin (CEEMIR), jehož hlavním cílem je revize zásob vybraných neenergetických surovin, které se řadí mezi kritické komodity EU. Jednou z částí projektu je Work Package WP4 - Prostorové modelování ložisek nerostných surovin, který se zabývá převedením vybraných ložisek do digitálních modelů s pomocí vhodných matematických postupů na základě studia a přehodnocení dat z archivních materiálů.

Prostorové modelování ložisek vychází z nutnosti, v rámci dostupných strukturně-geologických, geochemických a ložiskově-technologických parametrů, sestavit co nejvěrnější obraz dané ložiskové struktury a v jejím rámci následně vyhodnotit 3D distribuci konkrétního zrudnění v rámci výrazně heterogenního geologického prostředí. Zásadním problémem je přitom mj. absence jednotné, a moderním analytickým metodám odpovídající, vstupní databáze parametrů nezbytných pro výpočtové modely. Pro vybrané modelované ložisko, byla k dispozici data z 80., 70. let a v řadě případů ještě starších etap geologických průzkumných prací minulého století. Tato skutečnost je jedním z důvodů, proč není možno, bez dodatečného moderního ložiskového průzkumu, využít celosvětově využívaných softwarových řešení, nehledě na fakt že, pro analyzovaná malá ložiska, jakým je i ložisko uranu Brzkov, jsou všechny tyto softwary velmi drahé, a pro daná ložiska tedy potenciálně neekonomické.

## 2. Geologický popis ložiska uranu Brzkov

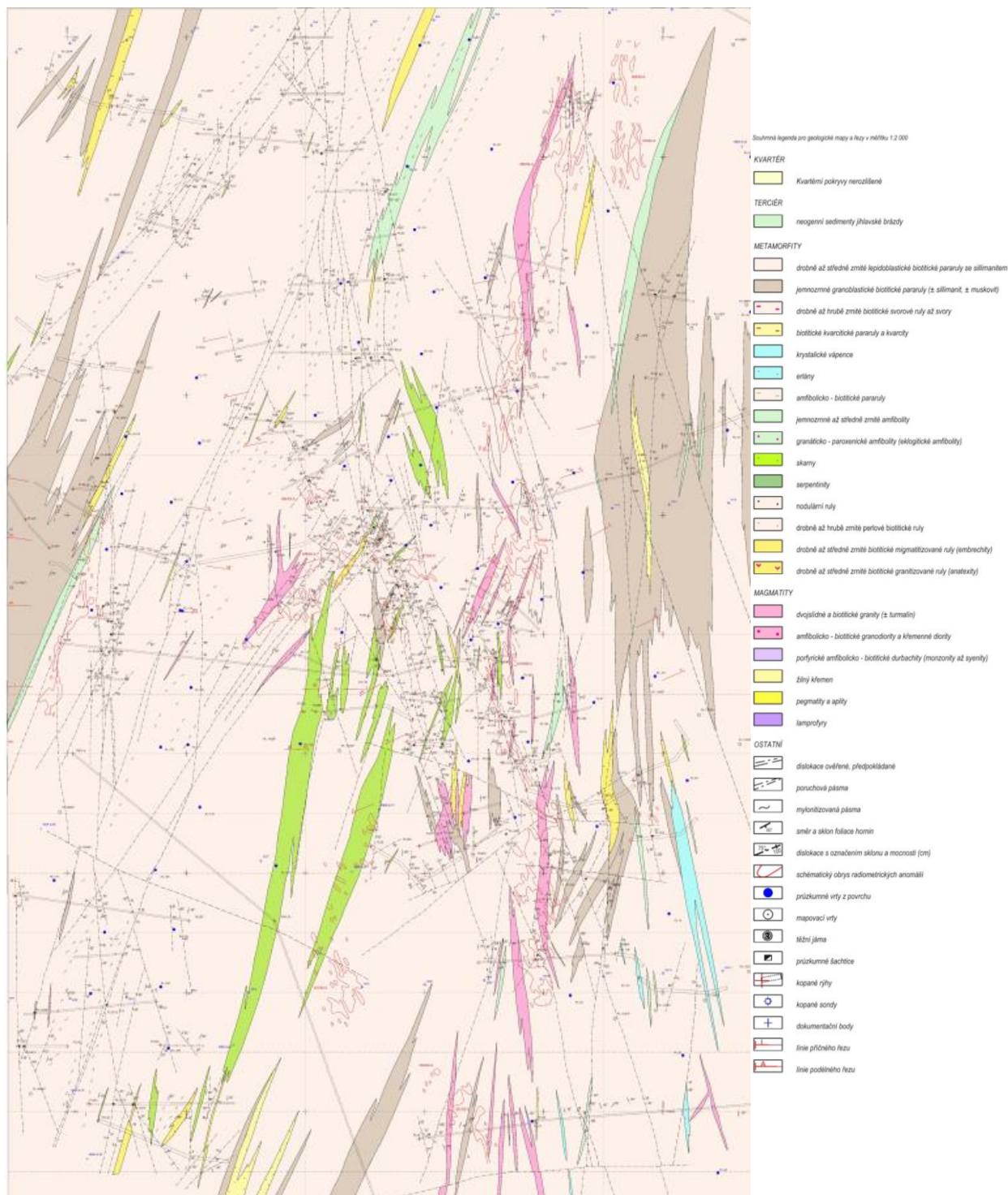
Z regionálně geologického hlediska je zájmové území ložiska Brzkov součástí strážeckého moldanubika, které je budováno proterozoickými horninovými komplexy. Samotné ložisko Brzkov je lokalizováno v prostoru křížení přibyslavské mylonitové zóny (doprovázené četnými tektonickými zónami směru S-J), se sázavským zlomem, (jehož povrchovými projevy jsou strmé dislokace směru ZSZ-VJV a SZ-JV, vyvinuté v exokontaktu třebíčského masívu). Strukturně-geologické schéma širší oblasti je prezentováno na obr. 1.



Obr. 1: Strukturně-geologické schéma širší oblasti ložiska Brzkov (Ondřík et al., 2014).

Rudní tělesa jsou vázána na tektonické dislokace směru SZ-JV a SSZ-JJV s úklonem 55-80° k SV resp. k VSV. Rudní struktury představují otevřené tahové struktury, které probíhají většinou kose k dislokacím sázavského směru (SZ-JV) a často vytvářejí v místech styku s dislokacemi jiných směrů složité rudní uzly. Jednotlivé rudní uzly ložiska Brzkov mají výraznou blokovou stavbu. Rudní tělesa jsou porušována dislokacemi směru SSV-JJZ s úklonem k VJV, podle kterých docházelo k pohybům dílčích tektonických ker či celých bloků. Celkově lze konstatovat, že tektonické poměry v jednotlivých rudních uzlech i na celém

ložisku Brzkov jsou velmi složité (obr. 2 a 3). Okolními horninami rudonosných struktur na ložisku Brzkov jsou v převážné míře migmatizované biotitické pararuly (v některých případech silimanit-biotitické nebo muskovit-biotitické) a amfibolity.



Obr. 2: Strukturně-geologická mapa úseku Brzkov dle podkladů DIAMO.

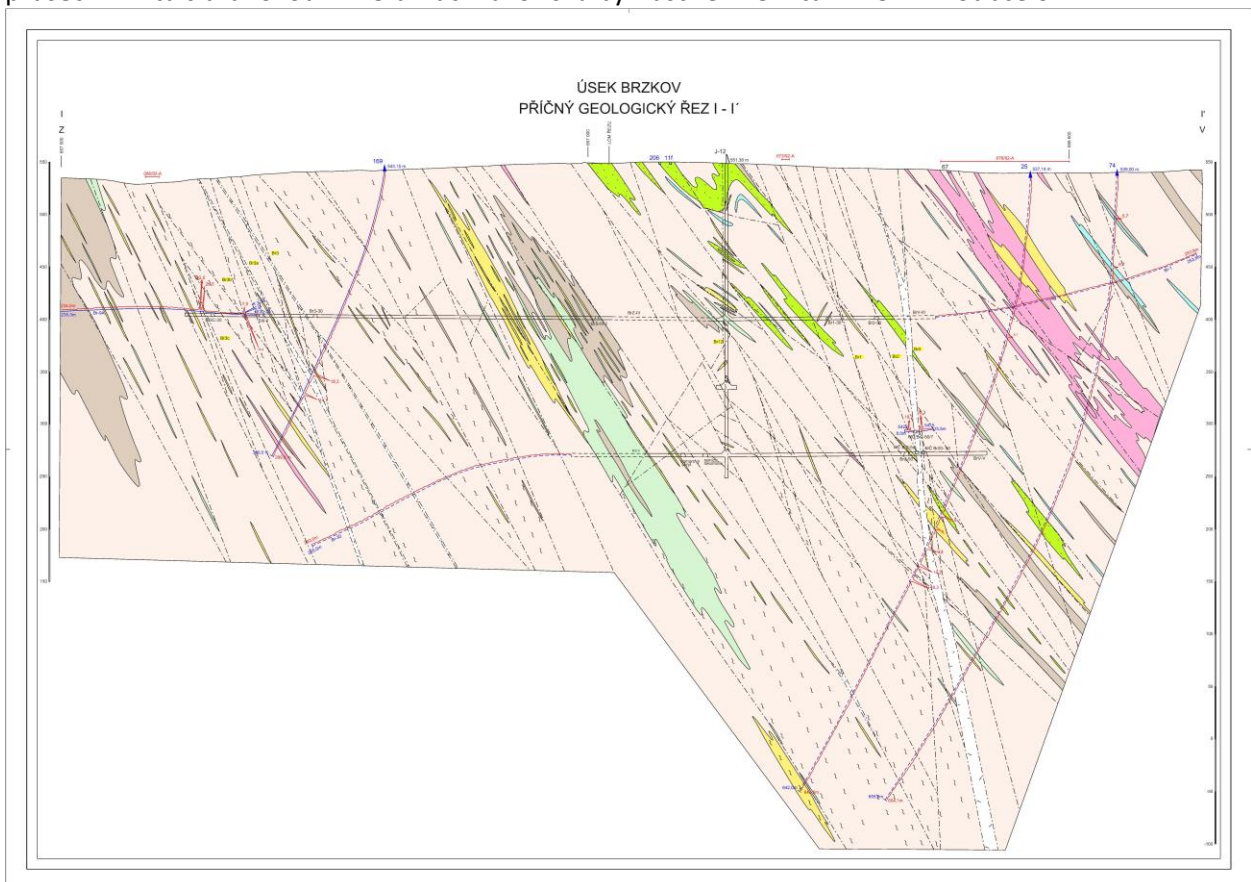


V horninovém profilu ložiska jsou dále zastoupeny skarny, krystalické vápence, kvarcité a erlány. Horniny jsou místně migmatizovány a slabě až silně mylonitizovány. Pevnost hornin v jednoosém tlaku se pohybuje od 70 do 120 MPa. Pokryvné útvary nepřesahují mocnost 2,0-3,0 m. Hluběji je již skalní podloží.

Na ložisku bylo prozkoumáno několik strukturních systémů, které vytvářejí tři význačné rudní uzly. Na úseku Brzkov v centrální (východní) části ložiska je lokalizován rudní uzel I tvořený 4 strmými rudními žilami směru SZ – JV s úklonem 55-80° k SV, a to: Br0, Br1, Br2 a Br4. V západním křídle úseku je lokalizován rudní uzel II, který vytváří strukturní systém Br3 (s rudními žilami Br3, Br3a, Br3b, Br3c). Tyto struktury mají směr zhruba S-J s průměrným úklonem 60° k V.

V místech tektonických komplikací jsou lokalizovány četné odžilky a složité žilníky. Jednotlivé rudní uzly ložiska Brzkov mají výraznou blokovou stavbu.

U-zrudnění je vázáno na několik subparalelních strukturních systémů směru SZ-JV a S-J strmě ukloněných k SV resp. k V, které prorážejí mylonitizované horniny strážeckého moldanubika. Povrchové projevy U-mineralizace jsou známy na strukturách Br1, Br1n a Br3 která je vůdčí tektonickou strukturou. Nejhlubší průsečík z vrtu s uranovou mineralizací na ložisku byl zastižen ve vrtu PI-197 v hloubce 611 m.



Obr. 3: Geologický řez ložiskem Brzkov, úsek Brzkov dle podkladů DIAMO (legenda viz obr. 2).

Tektonické poměry na ložisku jsou navíc komplikovány vrásou stavbou, která je charakterizována ostrými izoklinálními vrásami se západní vergencí. Generelní směr osních rovin kopíruje směr foliačních ploch hornin, tj. SSV-JJZ s úklonem k VJV. Celkově je ložisková oblast interpretována jako složité vrásové synklinorium.

V disjunktivní tektonice se vedle převládajících směrů SSV-JJZ a SZ-JV uplatňují tektonické struktury směru ZSZ-VJV s úklonem k JJZ a směru SV-JZ zapadající k JV, vzácně jsou vyvinuty dislokace směru V-Z.

Na rudním uzlu I (Brzkov-východ) byla ověřena rudní tělesa průzkumnými pracemi na žilách: Br1, Br2, Br0, Br3a, Br1b, Br1n, Br1j a Br1e. Mimo to byly zjištěny menší rudní čočky ověřeny na odžilkách Br1f, Br1i, Br1a, Br1h, Be1c, Br1k, Br1e, Br1o+Br1p, Br1q, Br1r, Br2a. Směrná délka rudních těles je řádově desítky až první stovky metrů, mocnost zrudnění od 0,3 do 8,0 m (na žilníku na III. p.). Žíly a odžilky se nachází v rudním uzlu označovaném jako Brzkov – východ.

V západním křídle úseku Brzkov, cca 450 m v podloží hlavních rudonosných struktur ložiska, je lokalizován rudní uzel II (Brzkov – západ). Důlními pracemi byl ověřen strukturní systém Br3, který má zhruba směr S-J s úklonem 80-85° k V. Důlními pracemi byla ověřována rudonosnost žil Br3, Br3a, Br3b, Br3c a odžilků.

Při hloubení jámy J-12 bylo indikováno kontrastní U-zrudnění mezi 192. m a 222. m na žíle označené jako Br12, která končí na ssv.-jjz. dislokaci s úklonem 70° k VJV. Žíla Br12 je velmi strmá, směru 340° s úklonem 85° převážně k VSV, lokálně je protiklonná, mocnost 10 - 30 cm. Výplň tvoří chloritizovaná horninová drť s úlomky aplitů a pegmatitů tmelené tektonickým jílem s hematitem či tektonická brekcie tmelená markazitem a narůžovělým karbonátem.

Na úseku Brzkov se pohybuje mocnost rudních žil mezi 0,3 – 3,2 m, průměrná mocnost je 1,5 1,7 m. Mocnost celkového zrudnění v komplikovaných žilnicích je až 8,0 m. Očekávaná kovatost těžené rudy z úseku Brzkov je (na základě předkládaného výpočtu zásob) 0,160 0,180 % U. Na úseku Brzkov je předpokládáno vysoké vnitřní znehodnocení v rámci RT.

Podrobněji se strukturně-geologické situaci ložiska Brzkov věnujeme v kapitole 3.3 Konstrukce 3D strukturního modelu.

### 3. Metodické postupy tvorby 3D modelu ložiska uranu Brzkov

Metodické kroky tvorby a vizualizace 3D modelu ložiska uranu Brzkov na sebe navazují. Ke konstrukci vlastního 3D modelu ložiska a jeho vizualizaci byly využity komerční softwary *MOVE*, *ArcGIS*, *Surfer* a *Voxler*. Pro zpracování vstupních údajů bylo nezbytné vyvinout vlastní pomocný software. Použité algoritmy zpracování údajů a vytvořený software jsou detailně popsány ve stejnojmenných podkapitolách:

- 3.1 Revize všech dostupných archivních materiálů, verifikace a korekce vstupních dat.
- 3.2 Výpočet a vizualizace prostorové lokalizace vstupních dat.
- 3.3 Konstrukce 3D strukturního modelu.
- 3.4 Výpočet topologie 3D gridu tělesa uranu podle 3D strukturního modelu (program *Uran\_Teleso*, modul Výpočet topologie 3D gridu tělesa).
- 3.5 Vizualizace technologických parametrů ve 3D.

Jednotlivé kroky metodického postupu jsou realizovány tak, aby bylo možno při libovolné změně parametrů tyto kroky programově rychle přepočítat bez nutnosti zdoluhavých ručních postupů. Proto je také možné snadno provést modelování v několika variantách (například s použitím více variant parametrů gridování apod.).

#### 3.1. Revize, verifikace a korekce vstupních archivních dat

Archivní data, geologické informace a geologické řezy (ve formátu jpg) nezbytné pro tvorbu 3D strukturního modelu byly převzaty od státního podniku *Diamo*. Z těchto informací byly kromě prostorové pozice jednotlivých horninových těles a tektonických rozhraní získány i prostorové informace ke strukturním datům a informace o analyzovaných vzorcích odebraných z povrchových a důlních děl, šachtic a rýh. Převzatá data byla ve formátu *xlsx*.

Pro účely 3D modelování obsahu uranu byly důležité vybrané údaje následujících tabulek:

- tabulka *OBJEKT*, celkem 675 průzkumných děl;
- tabulka *krvzor*, celkem 13577 řádků s údaji o metrážích (od, do, délka) vzorků;
- tabulka *radian*, celkem 9423 řádků s údaji o obsazích radioaktivních prvků vzorků;
- tabulka *průzkumné vrty Polná*, celkem 9423 řádků s údaji o inklinometrii povrchových vrtů.

Při zpracování těchto převzatých dat se vyskytly následující hlavní problémy:

1. Mnoho objektů nemělo údaje o metráži vzorků a u mnoha objektů neexistovaly analýzy uranu.

*Řešení přijaté po konzultaci s pracovníky Diama s.p.:*

- Bylo vytvořeno makro *Kontrola\_OBJEKT\_krvzor* (viz [1,3]): Pokud objekt z tabulky *OBJEKT* není v tabulce *krvzor* (a neexistuje k němu tedy žádná analyzovaná metráž), podbarví se název díla (1. sloupec) v tabulce *OBJEKT* hnědě – celkem 242 objektů. Tyto objekty byly vyřazeny.
  - Bylo vytvořeno makro *Kontrola\_OBJEKT\_radian* (viz [2,3]): Pokud objekt z tabulky *OBJEKT* není v tabulce *radian* (a neexistuje k němu tedy žádná analyzovaná vzorky uranu), podbarví se 2. sloupec *ALIAS* v tabulce *OBJEKT* modře - celkem 264 objektů. Tyto objekty byly rovněž vyřazeny.
2. U objektů není vesměs uváděn úklon a v mnoha případech ani azimut (pouze kód, například -4 pro lomené chodby, šikmé a vertikální komíny).

Řešení přijaté po konzultaci s pracovníky Diama s.p.:

- Azimut -2: je svislé dílo směrem dolů. Celkem je 115 svislých děl.
- U objektů BR-1 až BR-35 byl určen jednotný úklon 5 stupňů směrem nahoru. Celkem existuje 33 děl Br...
- Azimut -4: U důlních děl (celkem 46 děl se vzorky) se musely doplnit lomové body. U jednotlivých úsečků se vypočetl azimut a úklon nově vytvořeným makrem *Poc\_kon\_XYZ* (viz [3]) pro stanovení údajů inklinometrie úseků. Takto vzniklá „inklinometrie“ se přidala k inklinometrii povrchových vrtů.
- Azimut -5: Tyto vrty by měly mít inklinometrii. Bylo vytvořeno makro *Kontrola\_OBJEKT\_inklino* (viz [3]): Pokud k objektu z tabulky *OBJEKT* s azimutem -5 neexistuje inklinometrie, podbarví se *Azimut* (13. sloupec) v tabulce *OBJEKT* modře. U třech vrtů inklinometrie chyběla (vrty PL-6-GP, PL-7-GP a PL-8-GP), u nich bylo pracovníky Diama s.p. stanoveno: „Inklinometrie u vrtů PL-6-GP, 7-GP a 8-GP nebyla měřena, podle projektů však u všech těchto vrtů můžeme stanovit počáteční úklon 30° (od svislice) a azimut 270°“. Celkem je 71 povrchových děl.
- U objektů se stanoveným azimutem a chybějícím úklonem bylo přijato následující řešení: typ objektu „Z“ („vrt šikmý nebo horizontální – podzemní“) má úklon 5 stupňů, typy objektů „D“ („vodorovné n. šikmé díla“) a „R“ („rýha“) jsou vodorovné. Celkem je 148 takových děl.

The image shows a detailed data table with columns labeled A through V. The rows contain numerical data for various objects, including identifiers like 'DILO', 'OBJEKT', and 'AZIMUT'. The table is color-coded, with red highlighting in columns M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V and blue highlighting in columns A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L. The data appears to be related to geological or mining operations, as indicated by the text above.

Obr. 4: Ukázka tabulky *OBJEKT* po zpracování bodů 1 a 2.

3. Chybějící a nesprávné údaje v inklinometrii vrtů.

Řešení přijaté po konzultaci s pracovníky Diama s.p.:

- Opraveny hloubky 1. měření na 0 m (žlutě podbarveny v tabulce *Trajectories* – viz níže).
- Azimuty s kódem -1 nahrazeny váženou (podle délek úseků) lineární interpolací azimutů úseků nad a pod chybějícími údaji (žlutě podbarveny v tabulce *Trajectories* – viz níže).
- U několika vrtů byla jejich hloubka podstatně větší než údaje o inklinometrii (PL-13, PL-187, PL-22, PL-197...) – u nich byla doplněna inklinometrie v konečné hloubce vrtů s úklonem a azimutem shodnými s posledním měřením.

- Opraveny nalezené zjevné překlepy (zeleně podbarveny v tabulce *Trajectories* – viz níže).

4. Metráže vzorků s různými obsahy uranu se překrývají.

Řešení přijaté po konzultaci s pracovníky Diama s.p.:

- Bylo vytvořeno makro *Kontrola\_navaznosti* (viz [3,4]) pro zjištění porušení návaznosti. V mnoha případech je to způsobeno zápornou délkou vzorků (viz následující bod). U ostatních vzorků bylo rozhodnuto, že se budou překrývající vzorky průměrovat.

5. Záporné délky vzorků u záseků. Pracovníky Diama s.p. bylo sděleno: „Vzorky se odebíraly z čelby, která měla plochu cca 3x3 m, tzn., že každý vzorek odebraný z kteréhokoliv místa této čelby, měl stejnou metráž. U těchto „duplicitních“ vzorků se délka díla udávala se zápornou hodnotou, což je logický nesmysl, ale mělo se tím vyjádřit jiné místo odběru ve stejné vzdálenosti od počátku díla.“ A také: „Zásekové vzorkování (stejně jako radiometrické vzorkování čelby bylo prováděno vždy od levého boku k pravému boku.“

Řešení přijaté po konzultaci s pracovníky Diama s.p.:

- V makru *Udaje\_Dila* (viz dále) se při výpočtu souřadnic X, Y, Z středů úseku vzorků v dané metráži sečte metráž „záporných“ vzorků a umístí se symetricky zleva doprava kolmo na osu díla podle vzrůstajícího čísla vzorku.

1	ID	Easting	Northing	Elevation	Azimuth	Dip	Depth	H	I
364	PL-83	-656687.64	-1114987.32	552.05	0	-90	650		
365	PL-84	-656725.21	-1114803.99	538.67	0	-90	652.8		
366	PL-8-GP	-657358.62	-1115759.54	534.01	270	-60	82.6		
367	PL-9	-656938.78	-1115796.81	550.15	0	-90	197.6		
368	BR10-51	-656785.5	-1115680	272.5	0	0	2		
369	BR1-30	-656798.10	-1115791.70	402	0	0	170		
370	BR1-31	-656791.8	-1115791.4	402	0	0	340.7		
371	BR1-50	-656803.79	-1115616.80	272	0	0	138.4		
372	BR1-51	-656791.8	-1115650.8	272.2	0	0	54		
373	BR1B-3/2-2	-656839.7	-1115623.3	402.6	261.17	72	58.2		dovrchní
374	BR1B-3/2-4	-656847.2	-1115507.7	403	193.4023	71.32713	21.8		dovrchní
375	BR1B-30	-656817.1	-1115659.8	402.4	0	0	273.8		
376	BR1B-50	-656841.7	-1115519.3	272.2	0	0	204.9		
377	BR1C-30	-656815.3	-1115649.1	402.4	0	0	65.4		
378	BR1D-30	-656840.6	-1115615.7	402.6	0	0	56.1		
379	BR1E-30A	-656719.5	-1116011.8	403.3	0	0	42		
380	BR1E-31	-656722.1	-1116041.8	403.4	0	0	4.6		
381	BR1F-30	-656804.6	-1115630.3	402.4	0	0	28.5		
382	BR1G-3/2-2	-656814.3	-1115616.5	402.4	79.59229	78.55136	33.2		dovrchní
383	BR1G-30	-656812.66	-1115619.21	402.4	0	0	17.4		
384	BR1H-30	-656816.5	-1115607	402.4	0	0	10.5		
385	BR1H-31	-656813.58	-1115610.26	402.4	0	0	22		
386	BR1I-30	-656810.41	-1115609.84	402.4	0	0	54.5		
387	BR1I-30	-656814.09	-1115603.35	402.4	0	0	71		
388	BR1J-50	-656791.2	-1115619.2	272	0	0	56.5		
389	BR1K-30	-656826.37	-1115557.96	402.6	0	0	15.3		
390	BR1K-50	-656839.6	-1115551.1	272.2	0	0	35		
391	BR1L-31	-656791.5	-1115794.5	402	0	0	13.7		
392	BR1M-31	-656790.5	-1115798.5	402	0	0	2.5		
393	BR1N-30A	-656930.1	-1115557.9	403.5	0	0	203.3		
394	BR1P-51	-656789.4	-1115672	272.5	0	0	20.8		
395	BR2-3/2-1	-656744.2	-1115805.5	402.4	205.4417	87.37	52.7		dovrchní
396	BR2-30	-656758.4	-1115769.3	402.1	0	0	39.6		
397	BR2-31	-656762.8	-1115775.3	402.1	0	0	100.8		
398	BR2-5/4-1	-656716.8	-1115774.2	271.5	152.1985	88.60322	21.2		dovrchní
399	BR2-5/4-2	-656736.3	-1115721.6	271.5	265.0032	85.11645	26.4		dovrchní
400	BR2-50	-656734.1	-1115754.1	271.4	0	0	160		
401	BR2-51	-656735.33	-1115758.74	271.4	0	0	253.7		

Obr. 5: Ukázka tabulky *Collars*.

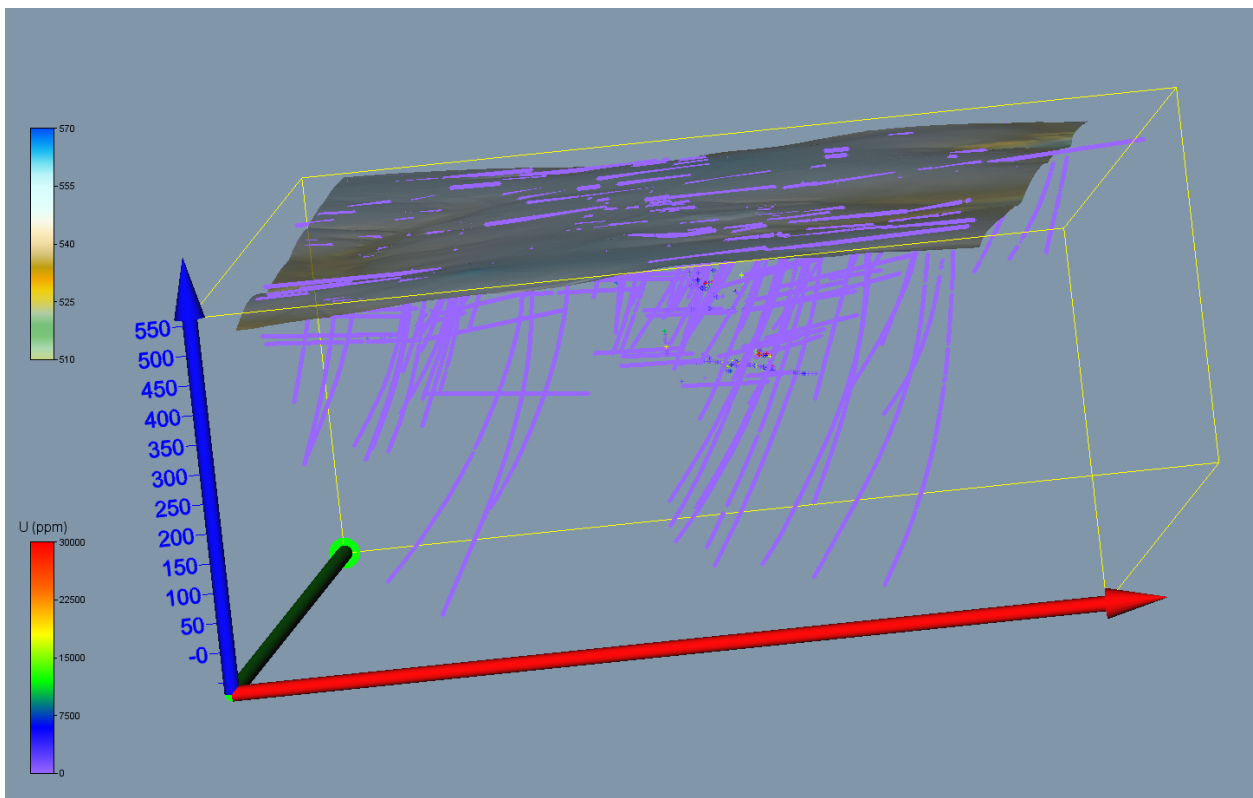
6. Chybějící obsahy uranu.

Řešení přijaté po konzultaci s pracovníky Diama s.p.:

- Obsah uranu se nachází v tabulce *radian* celkem v 5 sloupcích. Do výpočtu použít *U\_LUM*, není-li, pak *U\_CHEM*, není-li, pak *U\_RADIO*, není-li, pak *U\_RTG\_F*, není-li, pak *U\_GAMAS*.
- Obsah uranu -8 (celkem u 26 vzorků). K tomu sdělení pracovníků Diama s.p.: „Kód -8, uvedený v databance pro obsah uranu znamená, že analýza byla provedena, avšak výsledky této analýzy nejsou dostupné“ – tyto údaje byly proto vyřazeny ze zpracování.

Další verifikace vstupních dat byla prováděna konfrontací s archivními materiály a také s pomocí vizualizace (ve 2D a ve 3D) a srovnáním s příslušnými archivními horizontálními a vertikálními řezy. Přitom byly zjištěny chyby, které byly způsobeny nejen překlepy souvisejícími s digitalizací archivních podkladů. Chybné údaje byly opraveny.

Do kopie souboru *Brzkov data ČSUP.xlsx* s názvem *Brzkov data ČSUP\_F.xlsm* byly doplněny listy *Collars* (s údaji o 415 objektech, které zůstaly z tabulky *OBJEKT*) a *Samples*. Makrem *Udaje\_Dila* (viz [3]) se následně z tabulek *OBJEKT*, *krvzor* a *radian* naplnila tabulka *Samples*: z tabulky *krvzor* se podle názvu díla vyberou čísla vzorků s metrážemi od-do a délkou vzorku a z tabulky *radian* se podle čísla vzorku doplní obsah uranu. Celkem se v tabulce *Samples* vytvořilo 9375 vzorků různé délky. Na závěr činnosti makra *Udaje\_Dila* (viz [3]) se vzorky utřídí podle 1. sloupce „ID“ (název díla), 3. sloupce „To“ (metráž do) a 3. sloupce „Cislo\_vz“ (čísla vzorku) z důvodu zpracování vzorků záporné délky (viz bod 5 výše).



Obr. 6: Lokalizované údaje obsahu uranu v prostředí Voxler.

Byl vytvořen soubor *Data\_3\_2018.xlsm*, do nějž byly ze souboru *Brzkov data ČSUP\_F.xlsm* zkopírovány tabulky *Collars* (ukázka viz obr. 5) a *Samples* a nově byla vytvořena tabulka *Trajectories* na základě inklinometrie děl – viz bod 3 výše. Celkem existuje 4814 řádků údajů inklinometrie.

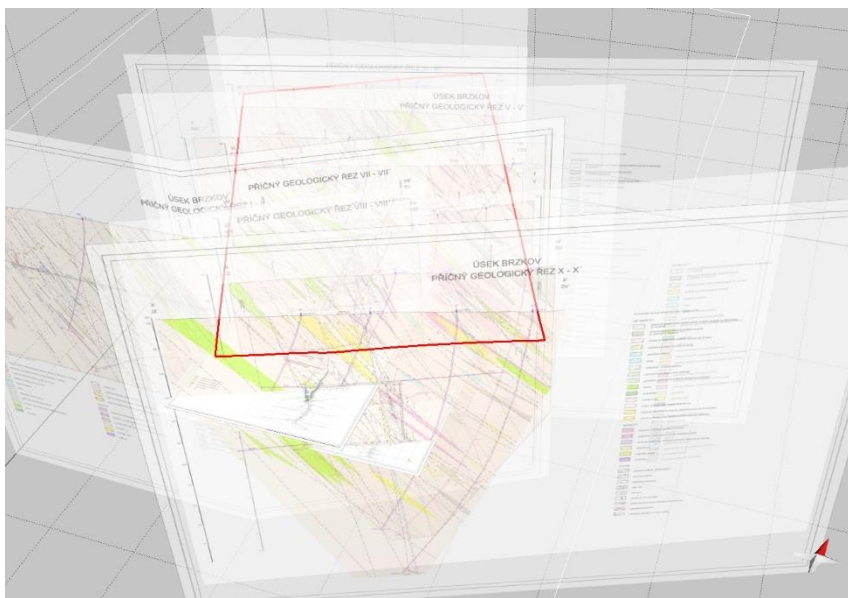
### 3.2. Výpočet a vizualizace prostorové lokalizace vstupních dat

Opravené a doplněné vstupní údaje (geometrické parametry průzkumných děl a vzorky s obsahy uranu) se s pomocí speciálně vytvořeného makra *XYZ\_data\_Ink* (viz [3]) rozdělují po 10 cm úsecích (celkem 345133 úseků), prostorově se lokalizují (pokud má dílo inklinometrii, tak podle inklinometrie zadané v tabulce *Trajectories*, jinak podle azimutu a úklonu díla z tabulky *Collars*) ve středu každého úseku, ukládají se do listu *Analyzy\_Ink* a zároveň se vytváří textový soubor pro vstup analýz do programů *Voxler* a *MOVE*.

Tabulka *Analyzy\_Ink* je zdrojem údajů pro další zpracování: pro výběr dat pro tvorbu horizontálních a vertikálních řezů, pro statistické analýzy, vizualizaci ve 2D a 3D prostředí. Na obr. 6 jsou zobrazeny lokalizované údaje obsahu uranu z tabulky *Analyzy\_Ink* v prostředí *Voxler*.

### 3.3. Konstrukce 3D strukturního modelu

Ke konstrukci 3D strukturního modelu byla použita všechna dodaná data ke dni 10. 4. 2018. Jednalo se o důlní mapy uranového zrudnění ze čtyř hloubkových úrovní (455 m n.m., 427 m n.m., 402 m n.m. – III. patro, 272 m n.m. – V. patro), povrchovou geologickou mapu a 10 geologických řezů. Všechny tyto podklady dodané v *pdf* formátu byly georeferencovány a prostorově usazeny v softwarovém prostředí *MOVE 2018* (obr. 7). Z patrových map byly nadigitalizovány a následně prostorově zobrazeny vertikální a horizontální důlní díla. Pro tyto práce byl využit software *ArcGIS* a *MOVE*. Pro konstrukci 3D strukturního modelu byl použit výhradně program *MOVE*.

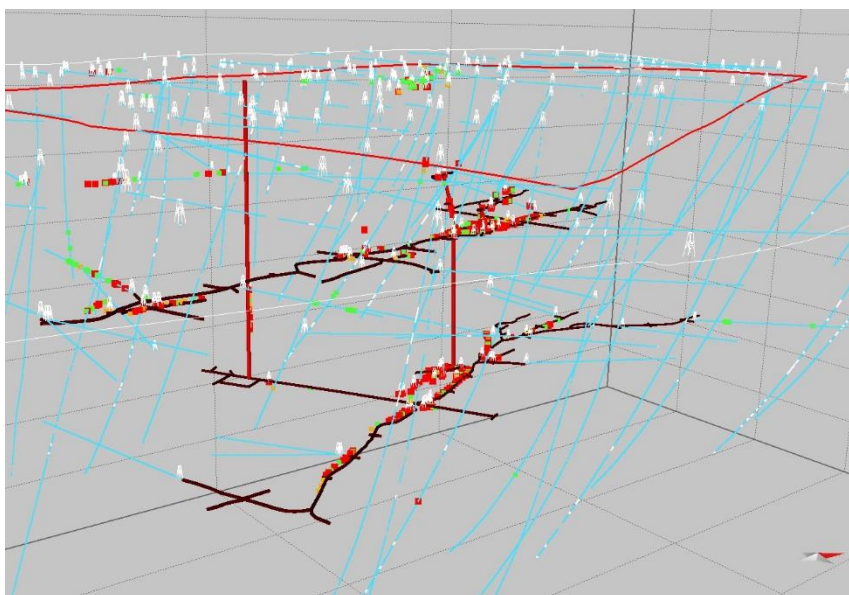


Obr. 7: Prostorově usazené patrové mapy ze čtyř výškových úrovní a geologické řezy.

Všechny 10 cm úseky vzorků s analýzami uranu z tabulky *Analyzy\_Ink* byly následně zobrazeny společně s důlními díly (obr. 8). Celkem se jednalo o 345 133 úseků vzorků. Pro snadnější orientaci a přehlednější zobrazení byly úseky vzorků rozděleny do 4 tříd podle obsahu uranu (1. třída 0-10 ppm, 2. třída 10-100 ppm, 3. třída 100-1000 ppm, 4. třída 1 000-200 000 ppm). Pro každou třídu byla zvolena odlišná barva a proporcionální zobrazení (obr. 8). Vynesení zmíněných dat do prostoru se ukázalo, že většina vrtů nezasahuje do zájmových rudních těles (Br0, Br1, Br2) a podstatná většina vzorků spadá do 1. třídy, tedy bezvýznamných obsahů uranu. Na základě těchto zjištění byl stanoven zájmový polygon (červený polygon

– obr. 8), zajímavější hlavní část ložiskového zrudnění Br0, Br1 a Br2 a současně bylo rozhodnuto, že nadále se budou pro modelování využívat pouze třídy vzorků 2, 3 a 4.

Použitá povrchová geologická mapa a geologické řezy především zobrazují průběhy litologických rozhraní a tektonických poruch. Uranové zrudnění na nich zobrazeno není. Z geologické mapy byly nadigitalizovány strukturní data průběhu foliace. Z geologických řezů byly nadigitalizovány průběhy identifikovaných tektonických zón, na které jsou vázána zrudnění uranu (Br0, Br1, Br2). Z těchto prostorově usazených linií průběhu tří nejvýznamnějších tektonických poruch byly vymodelovány jejich strukturní plochy.



Obr. 8: Prostorově zobrazená data uranového zrudnění z vrtů a důlních děl rozdělená do 4 tříd. 1. třída 0-10 ppm U (světle modré body), 2. třída 10-100 ppm U (zelené body), 3. třída 100-1 000 ppm U (oranžové body), 4. třída 1 000-200 000 ppm U (červené body). Stanovený zájmový polygon je zobrazen červenou barvou.

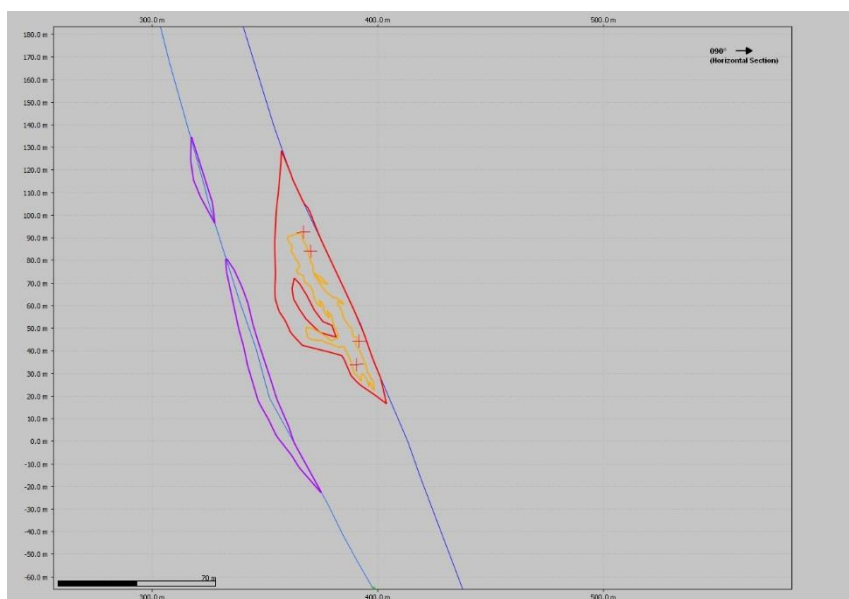
Z důlních map (čtyři výškové úrovně) byly nadigitalizovány hranice dosahu jednotlivých těles uranového zrudnění. Z prostorového zobrazení všech dodaných a digitalizovaných dat je zřejmé, že tělesa uranového zrudnění jsou vázána přibližně na tektonické poruchy, nicméně zasahují do okolních hornin v závislosti na míře jejich alterace. Většina těles má generelní průběh shodný s významnými tektonickými zónami SSZ-JJV. Tělesa často vyklíňují nebo se propojují. Propojení většiny těles je vázáno na struktury směru S-J, místy SSV-JJZ. Celkově lze morfologii těles zhodnotit jako soubor různě velkých plochých přibližně vertikálně orientovaných čoček, které se místy propojují.

Z charakteru zpracovávaných dat je zřejmé, že nelze jednotlivě modelovat každé digitalizované těleso zrudnění uranu z důlních map. Navíc data vzorků uranového zrudnění často leží mimo vymapované zrudnění (obr. 9). Proto bylo rozhodnuto, že blízká tělesa se spojí a odlehlá malá tělesa se modelovat nebudou. Současně bylo rozhodnuto, že modelované těleso je zjednodušené a zahrnuje data přilehlých vzorků zrudnění. Také platí, že modelované těleso je generelně vázáno na modelované tektonické zóny, má přibližně tvar ploché vertikálně orientované čočky, která se propojuje s jinými čočkami, a společně vytvářejí složité těleso připomínající žilník. Proto se nebudou modelovat tělesa vázaná pouze na bodové vzorky obsahu uranu, zvláště pak pokud neodpovídají průběhu tektonických poruch či foliaci. V zájmovém polygonu bylo vybráno celkem 10 těles uranového zrudnění různé velikosti a složitosti. Vzhledem



k významné odlehlosti dat především mezi III. a V. důlním patrem (130 m) se většina těles nepropojuje. Pouze jedno těleso prochází od povrchu přes všechna důlní patra až do hloubky 210 m n. m. (obr. 10).

Model uranového zrudnění vznikal postupně od jednodušších variant po komplikovanější. Každé zpracovávané těleso se modelovalo zvlášť, ale stejným postupem. První verze modelu každého tělesa byla velmi jednoduchá a sloužila především pro prostorovou kontrolu, zda všechny bodové hodnoty vzorků uranu jsou obsaženy uvnitř daného tělesa.



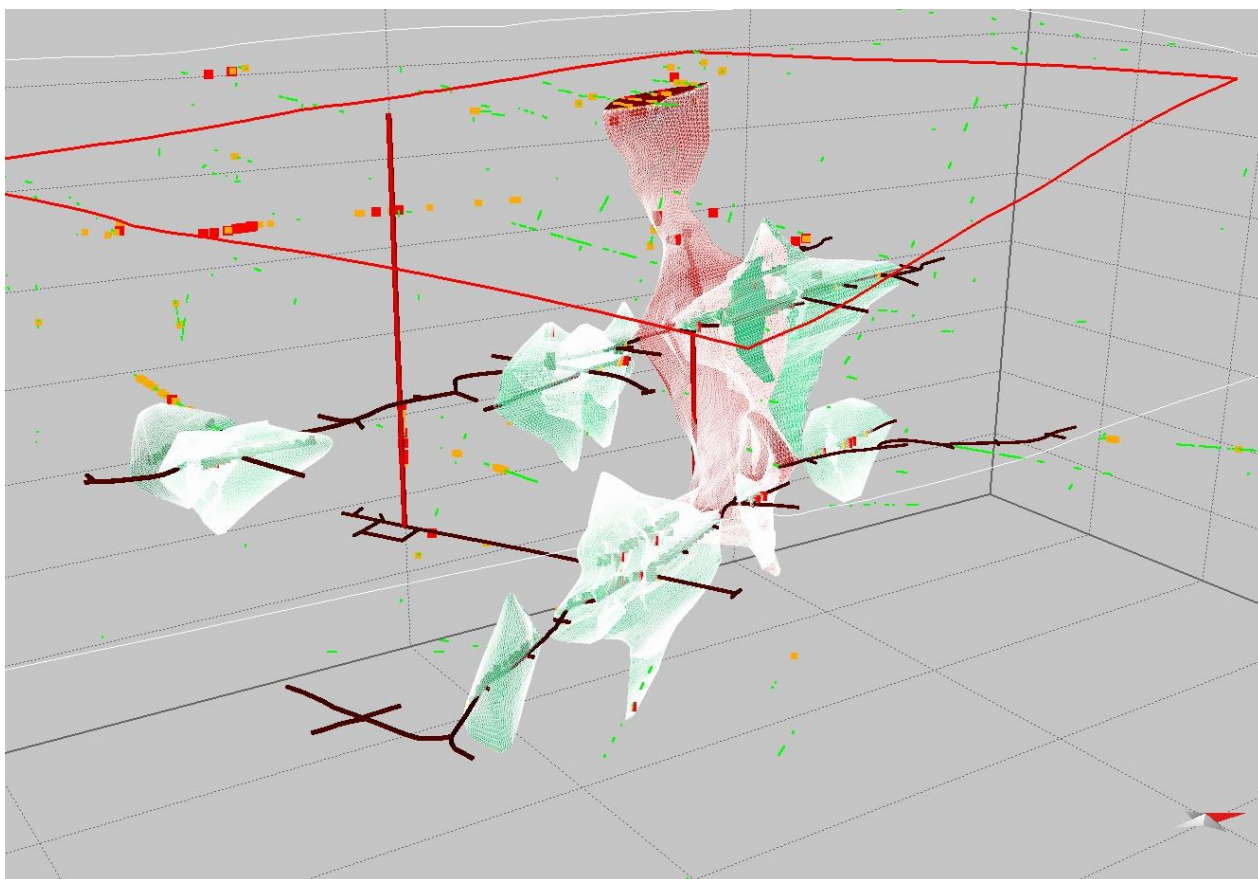
Obr. 9: Pozice vzorků uranového zrudnění (červené křížky), důlní činností vymapovaného zrudnění v úrovni 427 m n. m. (oranžová linie), průběh dvou tektonických zón (modré linie) a vytvořených obvodových polygonů dvou modelovaných těles (červené a fialové linie).

Na počátku modelování se vycházelo z výškové úrovně, kde se vyskytovalo nejvíce dat, tedy III. a V. patro. Zde byly vytvořeny obvodové polygony všech jednotlivých těles podle předem stanovených pravidel - viz výše (obr. 19). Tyto polygony se následně překopírovaly do okolních výškových sekcí (horizontálních řezů). Výškový krok sekcí byl stanoven na 10 m. V každé sekci byl zobrazen průběh významných tektonických poruch Br0, Br1 a Br2. Pokud do sekce zasahovala data z vrtů, byla také zobrazena. Překopírované polygony byly upraveny tak, aby odpovídaly průběhu a pozici tektonických poruch. Současně byla upravena také jejich velikost. Musel být dodržen tvar čočky, která zahrnuje blízká vrtná data uranového zrudnění. S ohledem na okolní data v sekcích se následně jednotlivá dílčí tělesa propojovala či štěpila. Uprostřed jednoho z těles takto vzniklo těleso bez zrudnění.

Tímto postupem byly vytvořeny horizontálně vertikálně odsazené obvodové polygony všech těles s krokem 10 m (obr. 11). Vznikla prostorová představa průběhu jednotlivých těles v prostoru. Bohužel použitý software MOVE neumožňuje vymodelovat takto komplikované plochy najednou. Bylo nutné rozdělit (rozpojit) jednotlivé linie na dílčí úseky. Zvlášť konkávní a konvexní křivky. Tyto dílčí křivky nad sebou v jednotlivých sekcích byly použity pro tvorbu dílčích mashů. Pro jejich konstrukci bylo zvoleno propojení pomocí B-splainu, protože vytvořené plochy lépe tvarově korespondovaly s představou celkového tvaru modelovaných těles. Zvolenou interpolační metodou byly vytvořeny všechny dílčí mashe, které následně byly spojeny v jeden mash reprezentující jedno těleso zrudnění.

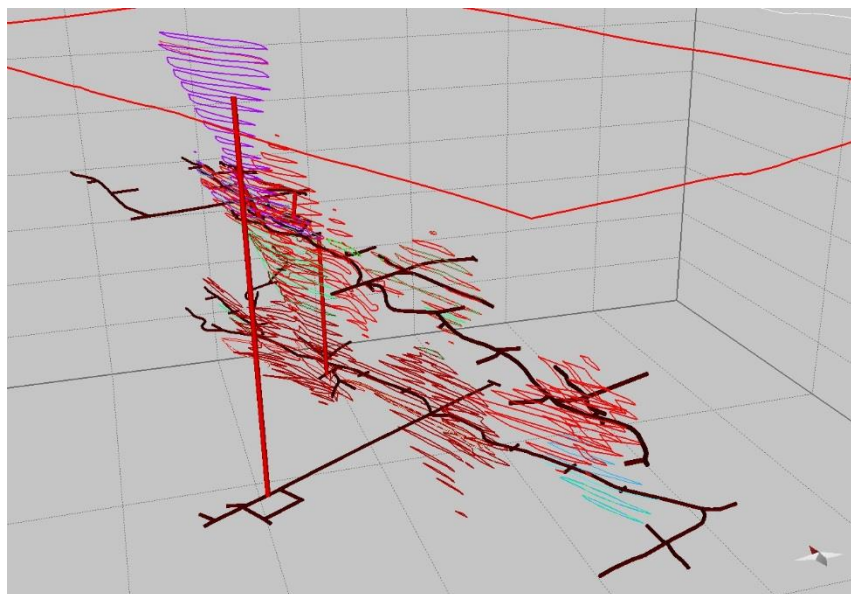
Vzhledem k charakteru interpolační metody v některých místech došlo k takovému zakřivení plochy, že bodové hodnoty vzorů uranového zrudnění se dostaly mimo modelované těleso. V těchto místech bylo nutné upravit rozsah obvodových polygonů v okolních sekcích a proces tvorby mashe opakovat.

Popsaným postupem byl vytvořen 3D strukturní model deseti těles uranového zrudnění (obr. 12). Jak již bylo zmíněno dříve, pouze jedno těleso (červené těleso E – obr. 10) prochází od povrchu přes všechna patra až do hloubky 210 m n. m. V tomto tělese se nachází nejvíce vzorků uranu ve třídách 2 – 4 a to v pěti výškových úrovních (přípovrchová data z rýh a sond, data z důlních děl hloubkových úrovní 455 m n. m., 425 m n. m., 402 m n. m. – III. patro a 272 m n. m. V. patro). Vzhledem k prostorovému rozsahu bylo toto těleso vybráno pro další demonstraci metodického postupu modelování obsahu uranu.

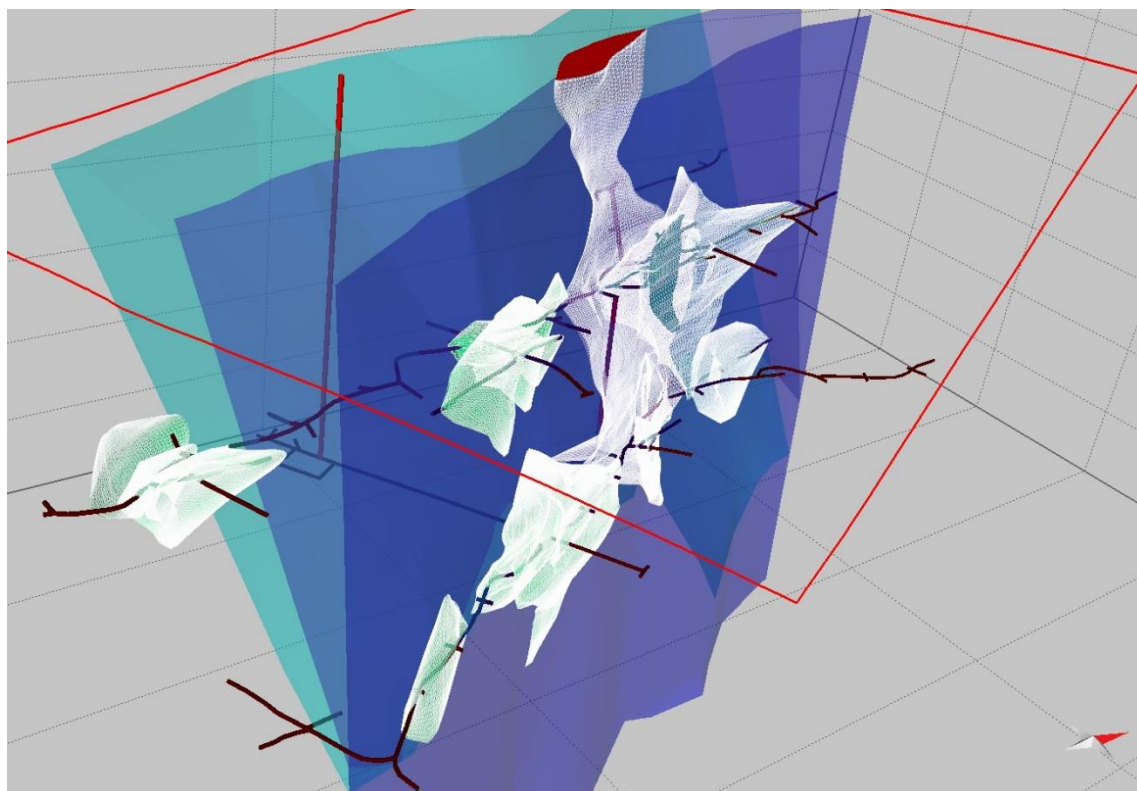


*Obr. 10: Pozice vzorků uranového zrudnění tříd 2 – 4, vertikálních a horizontálních důlních děl a deseti modelovaných těles uranového zrudnění. Svým rozsahem největší modelované těleso procházející z povrchu až do hloubky 210 m n. m. je vyznačeno červeně.*

Zájemové těleso E bylo následně rozřezáno do sekcí (horizontálních řezů) po 10 m. Vzniklo celkem 37 výškově odsazených polygonů (obr. 11). Vzhledem ke komplikované morfologii tělesa vzniklo na některých výškových úrovních více polygonů. Vzniklé polygony byly exportovány v podobě *shp* souborů. Software *Surfer*, který byl použit pro tvorbu technologického modelu, umí tento formát načíst a dále s ním pracovat.



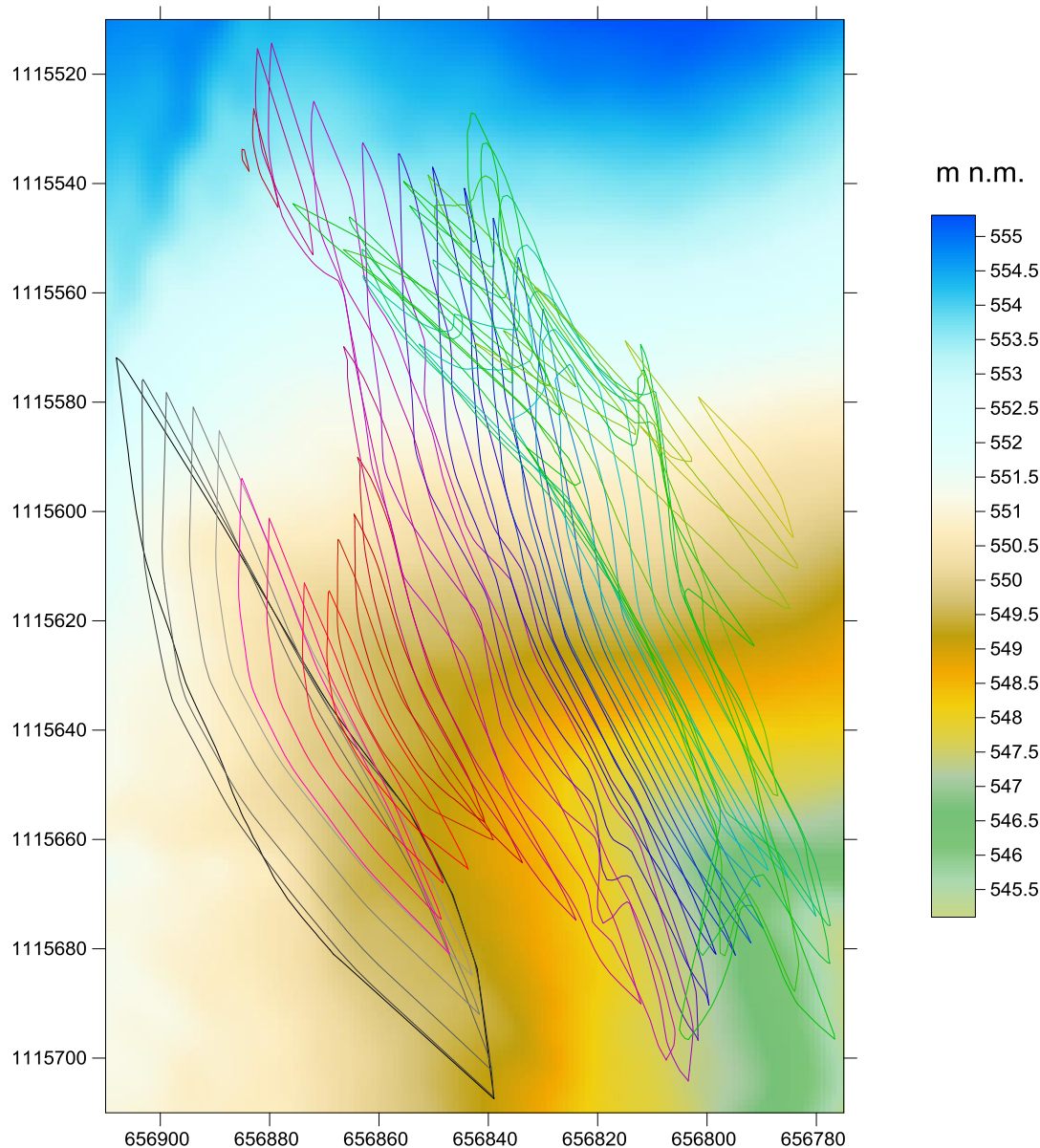
Obr. 11: Pozice po 10 m horizontálně odsazených obvodových polygonů modelovaných těles.



Obr. 12: Strukturální model zachycující deset modelovaných těles uranového zrudnění, důlní díla a průběhy významných zlomových zón (modré plochy).

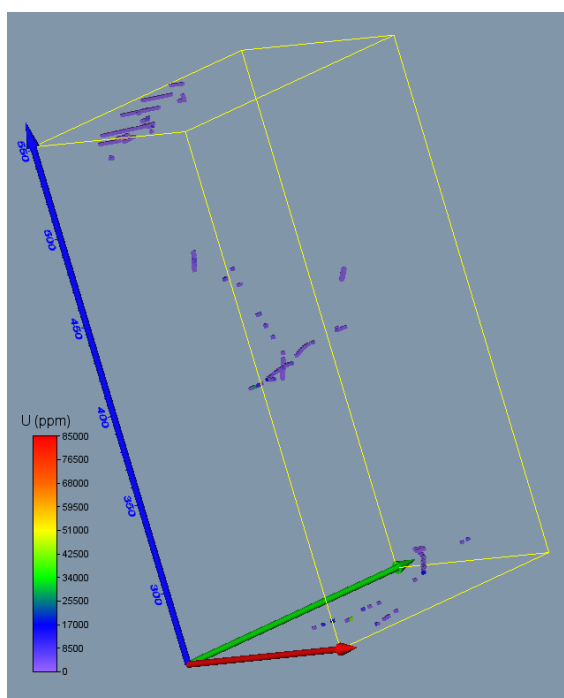
### 3.4. Výpočet topologie 3D gridu tělesa uranu podle 3D strukturního modelu

Celkem 37 obvodových polygonů tělesa E uranu (viz 3.3) vyexportovaných ze strukturního modelu ve výškových úrovních 220 až 550 m n.m. s krokem 10 m ve formátu *shp* (obr. 13) bylo v prostředí *Surfer* převedeno do formátu *bln* (výškové úrovně 430, 440 a 450 m n.m. obsahují dva obvodové polygony). Souřadnice X a Y byly v *shp* souborech zapisovány s přesností na 11 desetinných míst. Přitom souřadnice prvního a posledního bodu polygonu nebyly totožné, liší se na posledních místech. Proto bylo vytvořeno makro *BlnDat* (viz [3]), které souřadnice zaokrouhlí na 3 desetinná místa a také vytváří textový soubor pro vykreslení čísel bodů polygonu v prostředí *Surfer*. Vzniknou tak soubory *XXXmm.blm* a *XXX.dat*, kde *XXX* je postupně 220, 230, ..., 430\_a, 430\_b, ... 550.



Obr. 13: Obvodové polygony tělesa E uranu vyexportované ze strukturního modelu ve výškových úrovních 220 až 550 (od světle zelené, přes tmavě zelenou, modrou, fialovou, červenou až po černou) s krokem 10 m.

Protože pro tvorbu 3D gridů technologických parametrů musí vstupovat pouze hodnoty, které leží uvnitř tělesa uranu, byly makrem *Vyber\_Teleso* (viz [3]) z tabulky *Analyzy\_Ink* vybrány pouze tyto hodnoty a zapsány do tabulky *Analyzy\_Teleso* (obr. 14). Tabulka *Analyzy\_Teleso* bude zdrojem vstupních údajů pro vytvoření 3D gridů technologických parametrů tělesa uranu.



Obr. 14: Vybrané 10 cm úseky s analýzami uranu uvnitř tělesa.

Program *Uran\_Teleso* (viz [3,6]), modul *Výpočet topologie 3D gridu tělesa*, vytváří 3D grid topologie tělesa se zadanou hustotou (1\*1\*1 m se souřadnicí Z od 215.5 m n.m. po 554.5 m n.m.) ve formě textového souboru *Teleso\_3D\_grid.dat*. K tomu jsou využívány obvodové polygony tělesa uranu vyexportované ze strukturního modelu ve výškových úrovních 220 až 550 m n.m. s krokem 10 m ve formátu *bln*. Při zpracování posledního horizontu (3D grid v úrovních od 545.5 m n.m po 554.5 m n.m.) se zachovávají jen ty hodnoty, které nepřekročí nadmořskou výšku povrchu (viz [3]).

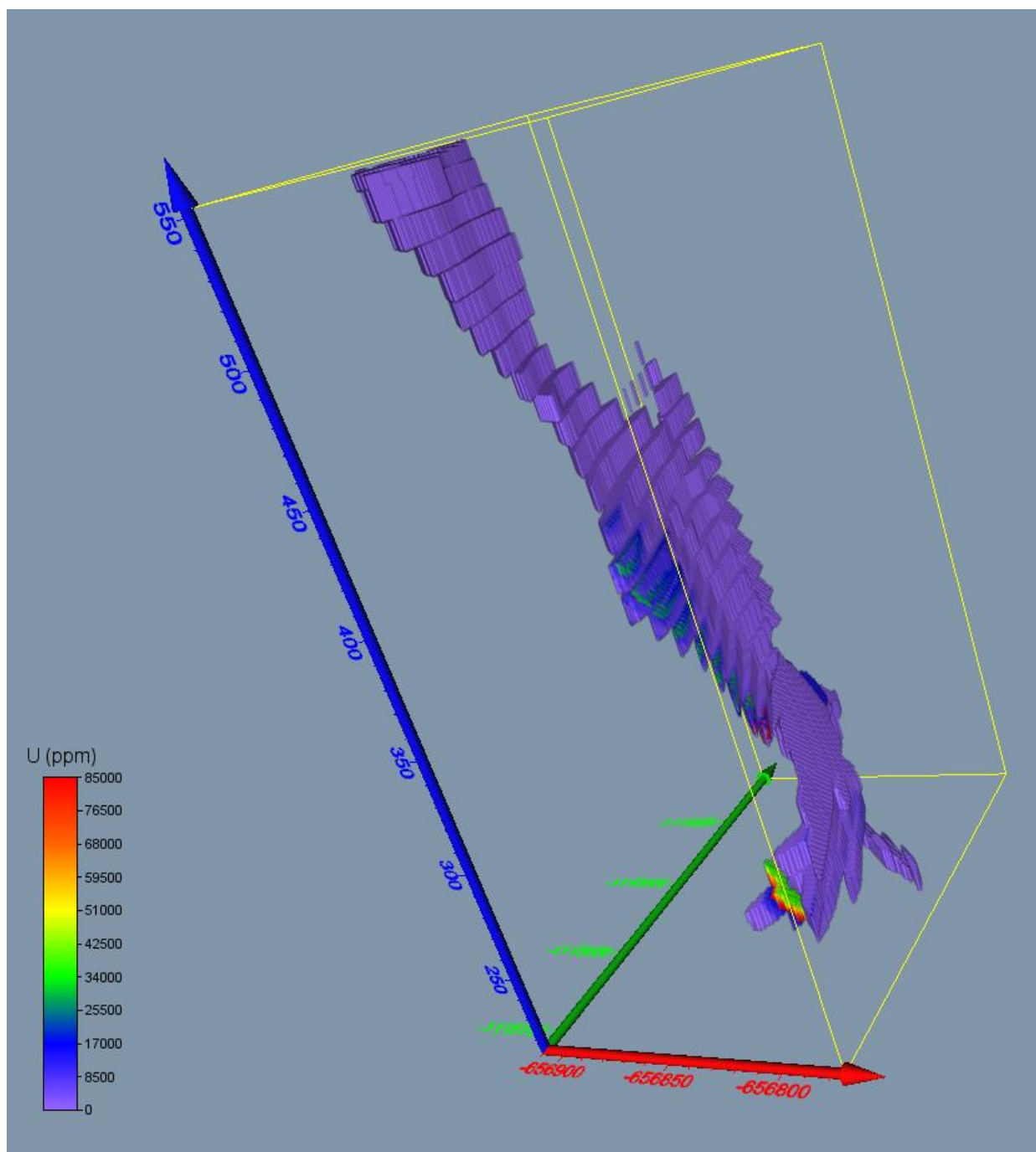
Program *Uran\_Teleso* obsahuje pět modulů:

1. Výpočet topologie 3D gridu tělesa uranu podle 3D strukturního modelu (tlačítko „Výpočet topologie 3D gridu tělesa“).
2. Odhad zásob na základě 2D gridů obsahu uranu a jejich převedení do 3D gridu (tlačítko „Výpočet hodnot 3D gridu tělesa, odhad zásob“).
3. Odhad zásob na základě 2D gridů obsahu uranu a jejich převedení do 3D gridu (tlačítko „Výpočet hodnot 3D gridů tělesa v NNR“).
4. Vizualizace horizontálních řezů ve 2D v prostředí *Surfer* (tlačítko „Vykreslení horizontálních řezů zadaných vrstev“).
5. Vizualizace sítě vertikálních řezů ve 2D v prostředí *Surfer* (tlačítko „Vykreslení zadaných vertikálních řezů XZ a YZ“).

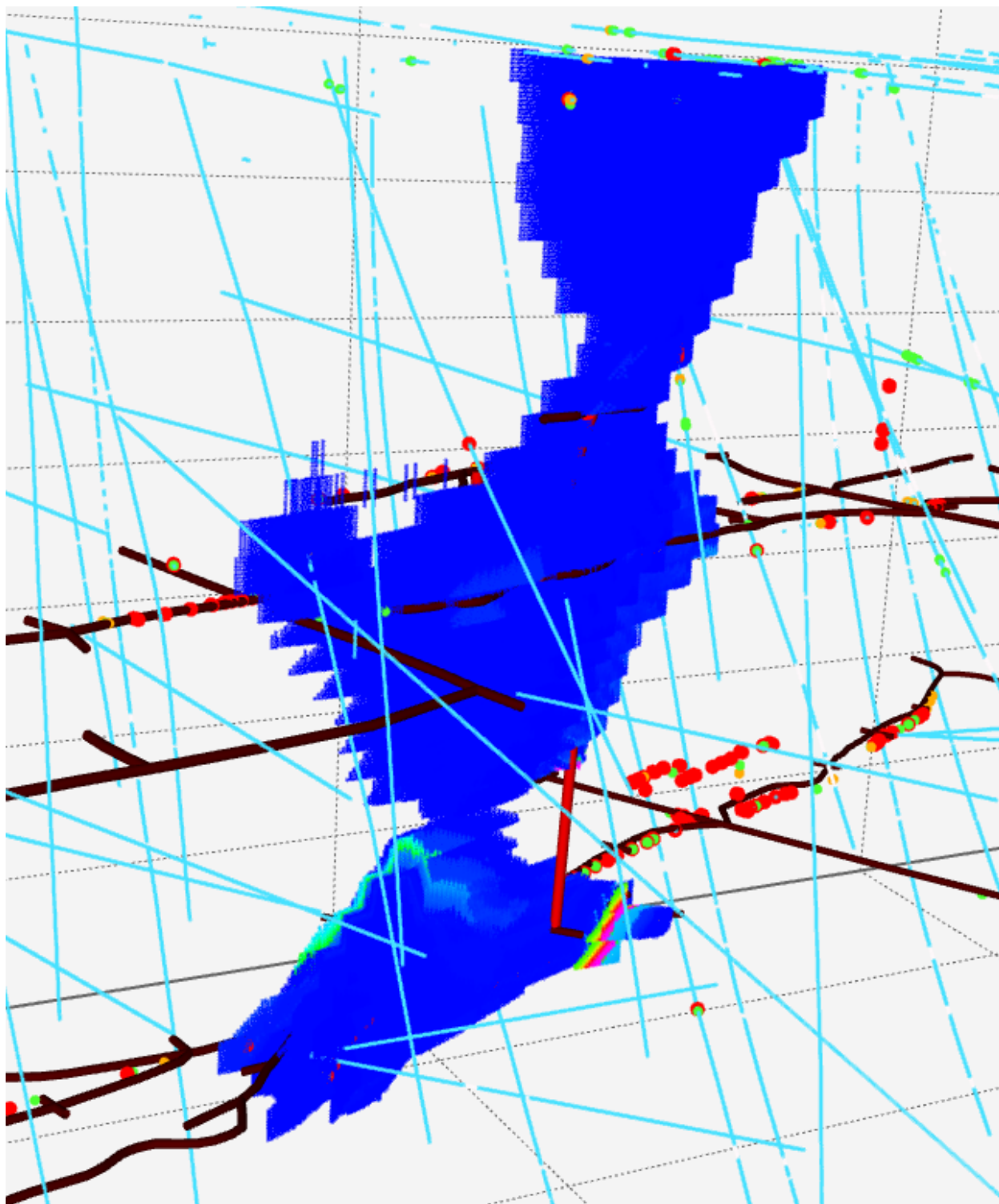
Podrobný popis programu *Uran\_Teleso* je dostupný v rámci certifikované metodiky na webových stránkách (<https://www.hgf.vsb.cz/511/cs/Projekty/CEEMIR/Vystupy/>).

### 3.5. Vizualizace technologických parametrů ve 3D

Technologické parametry – obsahy uranu lze vizualizovat v prostředí *Voxler* objektem *Gridder*, který vytvoří 3D grid obsahu uranu ve středech bloků 1\*1\*1 m a následně je vizualizovat přímo s pomocí modulu *ScatterPlot*. Nebo lze využít modul *VolRender* (obr. 15) či *OrthoImage*. Pro zobrazení tělesa uranu lze využít i software *MOVE*, kde vizualizace je podstatně jednodušší. Jednotlivé bloky 3D gridu se načítají jako body, kterým lze měnit velikost či barvu podle hodnoty obsahu uranu (obr. 16).



Obr. 15: Vizualizace obsahu uranu ve Voxleru modul VolRender.



Obr. 16: Vizualizace obsahu uranu v prostředí MOVE.

## 4. Věrohodnost výsledného modelu

Vzhledem k celkově heterogennímu pokrytí území 3D modelem archivními daty variabilní kvality, je nutno na výsledný model nahlížet jako na kvalifikovaný odhad průběhu a tvaru přítomných geologických těles. Omezujícím faktorem v procesu modelování je malá hustota a nerovnoměrnost průzkumných děl, kdy většina analýz pochází pouze ze tří hloubkových úrovní. Proto logicky věrohodnost výsledků modelování klesá se zvyšující se vzdáleností od prostorového umístění analýz.

Přesnější prostorový průběh modelovaných těles, jejich hloubkový dosah a tvar by bylo nutno před započítáním podrobnějších projektovaných prací a/nebo podrobnějších studií ověřit pomocí technických prací. Pro spolehlivý odhad hodnot 3D modelu geologického tělesa by mělo být těleso pravidelně a přítom hustě ovzorkováno.

Z hlediska modelování zlomových struktur je velmi obtížné korelovat zastižené poruchové struktury v důlních dílech se strukturami na povrchu. Zlomové struktury modelované na ložisku uranu Brzkov vycházejí z geologických řezů, které jsou zatíženy subjektivní chybou geologů, kteří je vytvářeli.



## 5. Technické parametry výsledku

Výsledek představuje 1 detailní 3D ložiskově geologický model ložiska uranu Brzkov o rozměrech 770 x 470 x 470 m. Model je doprovázen vysvětlujícím textem ve formě technické zprávy v českém jazyce. Vytvořený výstup vznikl v rámci řešení projektu TA ČR TE02000029 - Centrum kompetence efektivní a ekologické těžby nerostných surovin (CEEMIR), jehož hlavním cílem je revize zásob vybraných surovin. Pomocí tohoto modelu a vyvinuté metodiky (citace) je možné vytvářet variantní modely ložiska tohoto a podobných typů. Doplněním nových údajů lze provést rychlé aktualizace modelu a provést přepočítání zásob. 3D model je dostupný zde: <https://www.hgf.vsb.cz/511/cs/Projekty/CEEMIR/Vystupy/>.

## 6. Ekonomické parametry výsledku

Model slouží jako základ pro následný výpočet zásob uranu. Na základě vytvořeného 3D modelu ložiska lze rozhodnout o dalším postupu prací, který zefektivní těžební činnost. Přesný ekonomický přínos lze těžko vyčíslit, protože je závislý na aktuální ceně zpracovávané komodity. Ekonomický přínos výsledku spočívá také v možnosti provést konstrukci modelu a následný výpočet zásob i bez možnosti pořízení nových dat. Ekonomické srovnání lze provést pouze vůči jiným dnes komerčně používaným postupům výpočtu zásob. Tyto postupy využívají drahý software, který vyžaduje výkonný hardware a mnoho nových vstupních údajů. Pořízení nových dat podstatně navyšuje náklady na desítky až stovky miliónů korun. Bez dodání těchto dat v dostatečném množství tyto softwary nejsou schopny výpočet zásob provést.

## 7. Závěr

3D ložiskově geologický model ložiska uranu Brzkov je unikátní v tom, že specifikuje jednotlivé kroky tvorby modelu od pořízení potřebných vstupních údajů z archivní dokumentace, přes úpravu vstupních dat až po konstrukci strukturního modelu ložiska a jeho vizualizaci. Pomocí speciálně vytvořeného programového vybavení je zajištěna kontrola vstupních dat, kompatibilita použitých programů (MS Excel, Surfer, Voxler, SGeMS, MOVE) a je také realizována vizualizace ložiska ve 2D a ve 3D. Podrobný popis algoritmů používaných od přípravy dat až po vlastní variantní výpočet zásob je dostupný na webové stránce <https://www.hgf.vsb.cz/511/cs/Projekty/CEEMIR/Vystupy/> v rámci certifikované metodiky.

## Literatura

- [1] Deutsch, C., V., Journel, A., G.: *GSLIB – Geostatistical Software Library and User's Guide*. Second Edition. New York, Oxford University Press, Oxford, 1998, 369 s.
- [2] Goovaerts, P.: *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, 1997, 483 p.
- [3] Grygar, R., Staněk, F., Jelínek, J., Staňková, J. (2018): *ZPRÁVA O SPLNĚNÍ MILNÍKU WP4/4. MS, CEEMIR VŠB-TU Ostrava, 2017, 118 s.*
- [4] Journel, A., G., Kyriakidis, P., C.: *Evaluation of Mineral Reserves. A Simulation Approach*. Oxford University Press, 2004, 216 p.
- [5] Ondřík, J., Hájek, A., Šenk, B., Hlisnikovský, K., Toman, F.: *Studie proveditelnosti otvírky ložiska Brzkov - Souhrnná zpráva*. GEAM Dolní Rožínka, 2014, 128 s.
- [6] REMY, N., BOUCHER, A., WU, J.: *Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide*. New York: Cambridge University Press, 2009, xix, 264 p.

