



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



KRYCÍ LIST – VÝSTUPY

Název výstupu	Geologická mapa a 3D geologický model zájmové lokality
Číslo výstupu	6
Výzkumný program	Geologie zájmové oblasti
Partner/partneři	Česká geologická služba
Termín zpracování	05/2020

Název projektu	Modernizace výzkumné infrastruktury RINGEN (RINGEN+)
Registrační číslo	CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_013/0001792
Žadatel	Univerzita Karlova – Přírodovědecká fakulta

Výstup č. 6: Geologická mapa a 3D geologický model zájmové lokality

VP4: Geologie zájmové oblasti

Jan Franěk, Kryštof Verner

Česká geologická služba, květen 2020

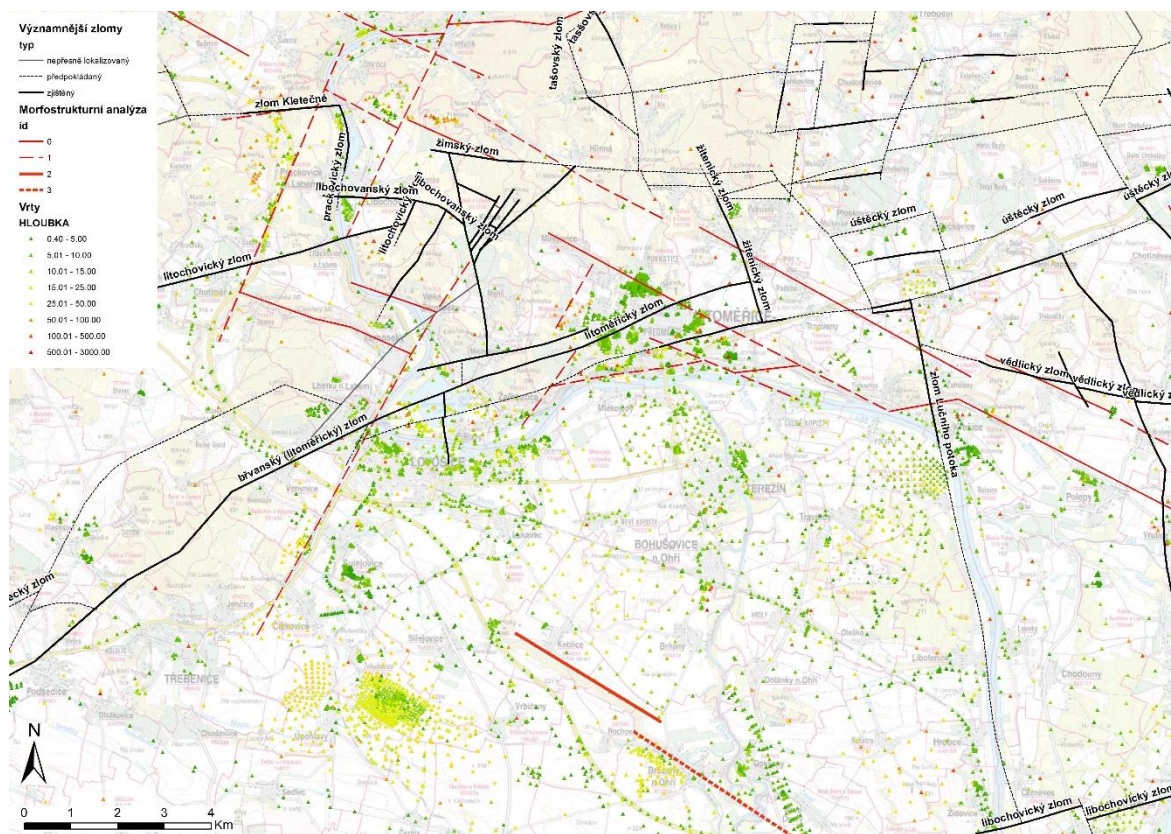
Úvod.....	3
Metodika tvorby 3D strukturně geologického modelu	4
Postup tvorby modelu a charakteristika vstupních dat.....	5
Založení projektu a nastavení projekce	5
Vytvoření sjednocené litostratigrafické legendy v souladu s geologickou mapou	5
Import sjednocené geologické mapy včetně zlomové sítě	6
Import rastrových podkladů a jejich rektifikace.....	7
Import vrtných dat	7
Import strukturních dat.....	7
Import DMR, projekce dat na DMR	7
Tvorba geologických těles	8
Tvorba zlomů	9
Pravidla modelování.....	9
Nejistoty modelů	10
Popsatelnost a predikovatelnost geologické stavby lokality	10
Rozsah a kvalita vstupních dat	10
Komplexita a extrapolovatelnost geologické stavby.....	12
Věrohodnost výsledného modelu	12
Reference.....	15
Digitální zdroje:.....	15

Úvod

V rámci projektu „Geotermální vrtné ověření struktury Litoměřice pro energetické využití“ (ev.č. 2A-1TP1/043), který byl součástí rámcového programu „Trvalá prosperita“ Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky, byl realizován 2111.2 m hluboký vrt PVGT LT-1 (GeoTermální Přípravný Vrt Litoměřice), situovaný na jihovýchodní okraj města Litoměřice (50° 32' 4" s.š., 14° 9' 13" v.d., 173 m n.m.). Jeho hloubení začalo 28. listopadu 2006 a skončilo 17.července 2007. Navzdory předběžným předpokladům nebyl vrtem zastižen žádný granitový masiv ani jeho kontaktní aureola, ani žádná významná zvodnělá tektonická zóna. Současný projekt RINGEN navazuje na tyto vrtné a výzkumné práce. Tato zpráva se zabývá shrnutím dostupných vstupních dat a následnou tvorbou 3D geologického modelu širšího okolí vrtu PVGT LT-1, zkonstruovaného v rámci infrastrukturního projektu RINGEN.

Modelovaný horninový masiv je tvořen převážně variským krystalinickým basementem, který náleží jednotkám Saxthuringika a Bohemika (Žáček a Škoda 2009, Mlčoch a Konopásek 2010). Krystalinikum je z menší části zakryto permokarbonskou vulkanosedimentární sekvencí a dále je z převážné části zakryto křídovými klastickými sedimenty. Křídové horniny lokálně překrývají tercierní (převážně oligocenní) vulkanity a vulkanoklastika, výjimečně také tercierní sedimenty, a protínají je žíly a přírodní dráhy těchto vulkanitů.

Křehká deformace se v zájmovém území projevuje vývojem několika populací puklin a několika epizodami zlomové aktivity, dokumentované především podrobnou analýzou nedalekých sedimentárních pánví. V regionálním měřítku (Obr. 1) lze identifikovat čtyři hlavní populace zlomů – SV-JZ ohárecký systém, SZ-JV labský systém, S-J jizerský systém a Z-V extenzní zlomy (Uličný et al., 2009a,b, Rajchl a kol. 2008, 2009, Mlčoch a Konopásek, 2010). Pohyby na těchto zlomech zahrnují 3 hlavní epizody tektonické aktivity: permo - karbonskou, křídovou a tercierní. Podle strukturního a sedimentárního záznamu byly minimálně SV-JZ a SZ-JV zlomové systémy aktivní již v permu, krátce po ukončení variské orogeneze (Uličný et al., 2009b).



Obr. 1 Mapa zlomové sítě zájmové oblasti obsahující zlomové linie zjištěné geologickým mapováním a morfostrukturní analýzou satelitních dat. Body představují pozice archivních vrtů, barevně je vyjádřena jejich hloubka.

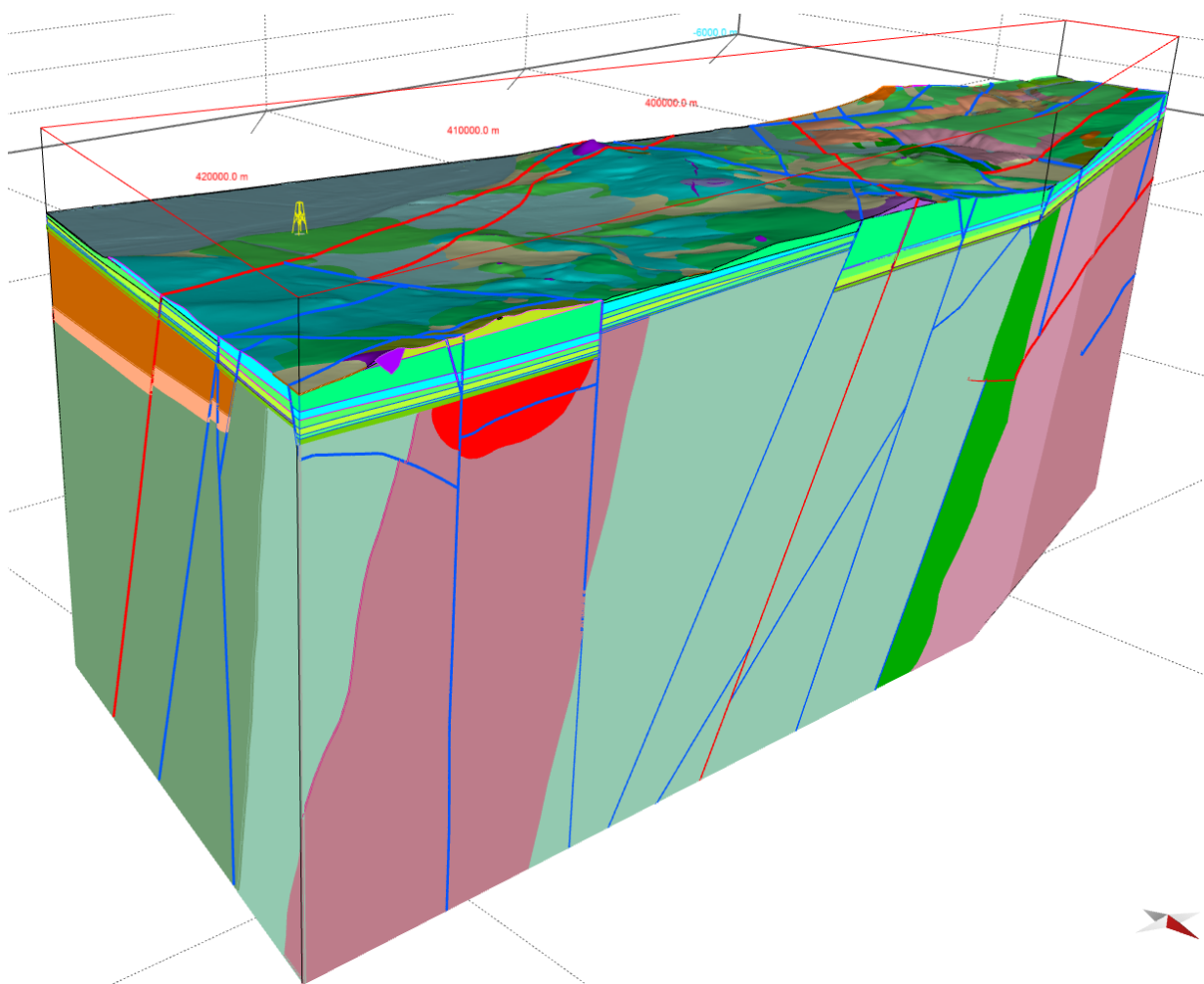
Poloha a rozsah polygonu 3D strukturně-geologického modelu byl vybrán tak, aby splňoval následující kritéria:

- Geotermální vrt PVGT-LT1 se nachází přibližně ve střední části polygonu,
- Polygon obsahuje důležité partie zájmového horninového masivu, včetně jeho kontaktů s okolními horninami tam, kde je to nutné. Dále obsahuje hlubší vrty důležité pro konstrukci nižších partií modelu

Cílem modelu je upřesnit průběh sedimentárních souvrství a zlomových struktur v zájmovém horninovém masivu, a dále zhruba odhadnout vývoj litologických rozhraní v podložních krystalinických horninách.

Metodika tvorby 3D strukturně geologického modelu

3D strukturně geologický model (Obr. 2) byl vytvořen jednotnou metodikou v jednom modelovacím SW (MOVE 2019.1 od firmy Petroleum Experts), v souřadnicovém systému UTM, zóna 33N a výškovém systému Bpv – Balt po vyrovnání. Plošný rozsah modelu je cca 59 km² s hloubkovým dosahem cca 5 km. Technicky je model složen z většího množství ploch, které reprezentují dva typy geologických objektů - litostratigrafické hranice a zlomové plochy. Jednotlivé plochy tvořící výsledný 3D strukturně geologický model jsou tzv. meshe, tvořené velkým množstvím vertexů, hran a malých dílčích sousedících ploch (v tomto případě vždy trojúhelníkových), které utvářejí danou plochu v geologickém modelu. Každý mesh s sebou nese minimálně atributy litologie (Horizon) a název (Name). Modelované plochy byly vytvářeny s pokud možno plynulým průběhem. Kromě povrchu a vnitřku modelu byly vždy konstruovány vertikální boční hranice a horizontální báze modelu, avšak s využitím polygonů namísto meshů. Topologické chyby v modelu dosahují měřítek jednotek nebo prvních desítek metrů (zejména nepřesnosti na hranicích sousedících ploch). Tyto chyby nejsou v měřítku modelu vizuálně patrné a zároveň využitý modelovací SW bohužel neobsahuje účinné nástroje na jejich odstranění.



Obr. 2 Celkový pohled na 3D model širšího okolí geotermálního vrtu PVGT-LT1 (zvýrazněn žlutě). Jedná se o netradiční pohled od SV na JZ.

Postup tvorby modelu a charakteristika vstupních dat

Následující text stručně popisuje postup tvorby 3D modelu v programu MOVE. Model byl vytvořen posloupností následujících kroků:

Založení projektu a nastavení projekce

Při založení nového projektu byl nastaven souřadnicový systém UTM, zóna 33N, neboť oproti souřadnicovému systému využívanému v rámci ČR: S-JTSK (Křovák East-North), disponuje několika technickými výhodami. Z nich jsou nejvýznamnější tyto dvě: 1. směr geografického severu se na území ČR výrazně méně odchyluje od souřadné osy Y (odchylka 0-3°) na rozdíl od systému S-JTSK (odchylka 6-8°) a 2. souřadnice představují kladná čísla 1. kvadrantu na rozdíl od systému S-JTSK, kde souřadnice představují ne zcela intuitivně záporná čísla z 3. kvadrantu. Importy vektorových dat a georeferencovaných rastrů z programů ARC GIS zpracovávaných v souřadnicovém systému UTM, zóně 33N, nebo v GIS do tohoto systému přeprojektovaných, pak proběhly bez problémů.

Vytvoření sjednocené litostratigrafické legendy v souladu s geologickou mapou

V návaznosti na jednotnou legendu pro sjednocenou povrchovou geologickou mapu bylo vytvořeno litostratigrafické členění v programu MOVE tak, aby jednotlivé nově vytvořené litostratigrafické jednotky (tzv. Horizons) odpovídaly předem definovaným názvům z nově vytvořené geologické mapy a byly barevně odlišeny. Geologická legenda použitá pro modelování byla vytvořena po vzájemných diskusích modeláře a odborníků z České geologické služby specializovaných na kvartérní geologii, tercierní, křídovou a permokarbonskou sedimentologii, tercierní a karbonskou vulkanologii a na krystalinickou geologii širšího regionu. Litostratigrafické jednotky byly navrženy již v počáteční fázi

projektu na základě znalostí regionální geologie, petrografických a stratigrafických argumentů. Při shromažďování a reinterpetaci všech dostupných geovědních dat se postupně ukázalo, že ne všechny navrhované jednotky bude možné jednoznačně rozlišit v celé modelované oblasti, zejména kvůli nedostatku / špatné kvalitě archivních dat. Z tohoto důvodu nebyly všechny původně plánované jednotky použity v konečné verzi 3D geologickém modelu. Celkově se výsledný model skládá z 25 litostratigrafických jednotek a 2 kategorií zlomů (Obr. 3).

	Horizon	Colour
1	Q_landslide	
2	Q_alluvial_fan	
3	Q_coluvial	
4	Q_fluvial	
5	TV_phonolites	
6	TV_volcanoclastites	
7	TV_basalts_compact	
8	TV_volcanites_efusive_all	
9	K_Santon_MerbolticeFm-sandstones	
10	K_Coniac_BreznoFm-Ca_claystones	
11	K_TuronUpper_TepliceFm-limestones	
12	K_TuronMiddle_JizeraFm-marlstones	
13	K_TuronMiddle_JizeraFm-Ca_sandstones	
14	K_TuronLower_BilaHoraFm-sandstones	
15	K_TuronLower_BilaHoraFm-marlstones	
16	K_Cenoman_PerucKorycanyFm-sandstones	
17	PC_undifferentiated-claystones_sandstones	
18	CV_TepliceRhyolite	
19	SX_Granite	
20	SX_orthogneiss	
21	SX_amphibolite	
22	SX_two_mica_pargneiss	
23	SX_gneiss_undifferentiated	
24	SX_phyllite_sometimes_quartzitic	
25	TBU_Grt_Ky_micaschist	
26	Fault_category_1	
27	Fault_category_2	

Obr. 3 Litostratigrafická legenda 3D modelu širšího okolí geotermálního vrtu PVGT-LT1.

Import sjednocené geologické mapy včetně zlomové sítě

Geologická mapa celého území 3D modelu byla vytvořena kompilací dostupných archivních geologických map a finalizována konzultacemi s odborníky na místní geologii křídových sedimentů, vulkanitů, permokarbonu, krystalinika a na lokální zlomovou tektoniku. Geologická mapa byla do projektu importována jako polygonová vrstva ve formátu shapefile (*.shp). Každý polygon měl již v atributové tabulce uvedeno jeho litologické zařazení dle předem vytvořené legendy (předdefinované v Horizons). V nastavení importu GIS vektorových dat v rámci programu MOVE pak byl pouze přiřazen tento atribut položce Horizon, každý polygon se tak přiřadil dané litologii nadefinované v Horizons. Import zlomové sítě (liniový shapefile) proběhl podobným způsobem. Po importu se linie zlomů zařadily do tří manuálně vytvořených Horizonů na základě snadno aplikovatelné a přehledné klasifikace švédské SKB (Andersson 2000) – Kategorie 1 pro regionální významné zlomy (délka obvykle přesahuje 10 km a mocnost dosahuje vyšších desítek až stovek metrů), Kategorie 2 pro regionální méně významné zlomy (délka cca 1-10 km, mocnost nižší desítky metrů) a Kategorie 3 pro zlomy lokálního významu (délka méně než 1, mocnost jednotky metrů).

Zlomová síť v této oblasti vykazuje složitou geometrii a vícefázový vývoj od závěrečných fází variské kolize přes pravděpodobnou mesozoickou aktivitu až po významný tercierní rifting a tercierní až kvartérní extenzi. Tento vývoj křehké tektoniky vedl k vývoji husté sítě zlomů, jejichž přesnou lokalizaci je často obtížné určit kvůli sedimentárnímu pokryvu a obecně špatné výchozové situaci. Všechny zlomy zjištěné v archivních materiálech a / nebo novým terénním výzkumem a reinterpetací archivních dat jsou obsaženy ve 3D geologickém modelu, neboť pozice a charakter jednotlivých zlomů jsou pro projekt geotermálního výměníku významným faktorem. Všechny zlomy byly pro účely modelování seskupeny s ohledem na jejich orientaci, což pravděpodobně naznačuje jejich genetický a geometrický vztah.

Import rastrových podkladů a jejich rektifikace

Import geologických a geofyzikálních řezů ve formě rastrových obrázků (Obr. 4) lze provádět v širokém rozsahu formátů, čistých rastrů i rastrů s uloženými metadaty (např. polohopis, výškopis aj.). V případě vertikálních geologických a geofyzikálních řezů byly nejprve importovány jejich průběhy jako 1 liniový shapefile. Z linií povrchového průběhu těchto řezů byly následně v MOVE vytvořeny tzv. sekce. Do každé sekce byl pak importován rastrový obrázek odpovídajícího řezu, přičemž ořez i georeferencování ve 3D byly provedeny během importu a následně transformací snímku v rámci sekce. Vertikální geologické řezy tvořily spolu s povrchovou geologickou mapou a reinterpetovanými vrtnými daty jeden ze základních vstupů pro tvorbu 3D geologického modelu. Tyto řezy sloužily k odhadu generálního sklonu jednotlivých vytvářených zlomů (zlomové plochy nejsou vedeny přesně podle řezů) a dále pro tvorbu mírně generalizovaného podpovrchového průběhu hranic horninových těles.

Import vrtných dat

Vrtná data jsou velmi důležitým zdrojem informací při konstrukci modelu a program MOVE jejich důležitost reflektuje propracovaným rozhraním importu průběhu vrtu a mnoha doplňkových informací. Vrtná data byla importována z textového formátu ASCII (*.csv nebo *.txt), přičemž vrty byly aproximovány jako vertikální pro naprostý nedostatek inklinometrických dat. Textové soubory obsahovaly název vrtu, zaměření vrtu ve formátu souřadnic XYZ (v souřadnicovém systému UTM, zóna 33N a výškovém systému Bpv – Balt po vyrovnání), údaj o hloubce vrtu v metrech, pro účely tohoto projektu nově reinterpetované údaje o litostratigrafických horizontech zastížených vrtem, pokud možno klasifikované dle legendy definované v Horizons, a jejich hloubkovém rozsahu.

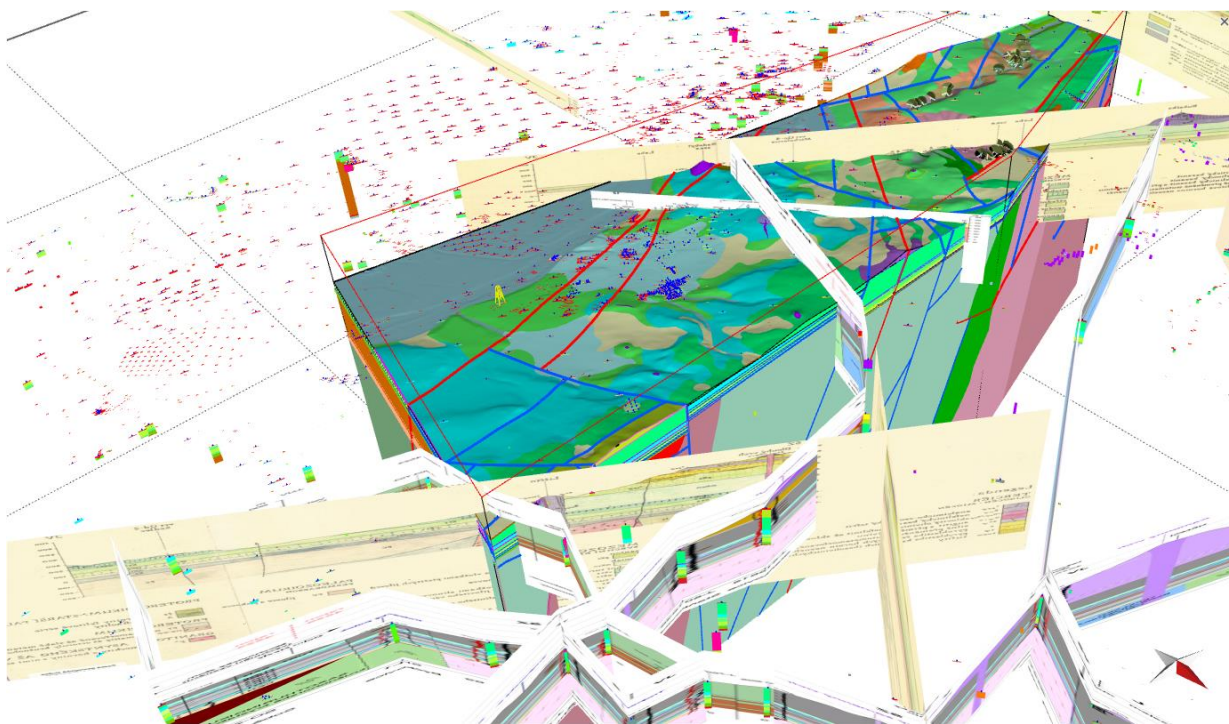
Import strukturních dat

Příprava strukturních symbolů probíhala obdobně jako příprava „horizontů“. Program MOVE obsahuje vlastní definice běžně využívaných strukturních znamének a dalších pomocných symbolů, které lze přiřadit k uživateli předem rozklasifikovaným strukturním prvkům relevantním pro tvorbu modelů – hlavně metamorfním foliacím, zlomům a puklinám. Ve 2D režimu se tektonická znaménka zobrazují v klasické podobě, ve 3D pak jako kruh (čtverec, trojúhelník, kužel) orientovaný ve směru sklonu a sklonu daného měření. Import dat proběhl z tabulky v textovém formátu (obdobně jako u vrtů) za využití souřadnic místa měření (X, Y) a samotných naměřených údajů.

Pro 3D geologický model bylo nutné v GIS transformovat archivní strukturní data z tištěných map (hlavně geologických map 1:25.000) do digitální tabulkové formy. Archivní struktury představují především foliační plochy. Nová strukturní data získaná během terénních prací v průběhu tohoto projektu byla použita pro validaci archivních strukturních dat a pro konstrukci modelu. Jednotlivá měření byla vizualizována z hlediska jejich orientace a použita jako jeden z podkladů zejména při konstrukci těles metamorfovaných hornin a při odhadu sklonu zlomových ploch.

Import DMR, projekce dat na DMR

Pro horní hranici modelu byl využit digitální model reliéfu (digitální model reliéfu 5. generace, ČÚZK 2016), který byl do modelu importován jako zjednodušený (resamplovaný) grid, na který byla dále vyprojektována geologická mapa, zlomové linie a další povrchová data. Zemský povrch bylo nutno zjednodušit (resamplovat) na velikost základní buňky 20 m z důvodu HW omezení, neboť v současnosti ani vyšší třída počítačů neumožňuje efektivně zpracovávat takto rozsáhlé 3D modely v hustotě meshů odpovídající podrobnosti DEM 5G.



Obr. 4 3D model včetně vyobrazení vstupních prostorových dat – reinterpreтованých vrtů, geologických a geofyzikálních řezů a v úsecích výchozů krystalinika také měřených ploch foliace.

Tvorba geologických těles

Samotná tvorba průběhu hranic geologických těles do hloubky byla v případě krystalinických hornin provedena s využitím konstrukčních linií. Tyto konstrukční linie byly částečně vytvářeny ve 2D horizontálních řezech, kde je snazší udržovat korektní topologii editovaných objektů, částečně editací přímo ve 3D prostoru. Následně byly tyto linie spojeny do jednotlivých ploch - meshů.

Tělesa sedimentárních hornin byla konstruována jiným způsobem. Vzhledem k relativně velkému množství vrtných dat byl vyvinut GIS nástroj pro interpolaci rozhraní sedimentárních vrstev s využitím interpolačního algoritmu „Topo to raster“, který se z většího množství testovaných interpolačních algoritmů ukázal pro tyto účely jako nejvhodnější – nevytvářel falešné peaky v místech velkého gradientu ale zároveň velmi dobře respektoval i odlehle hodnoty ve vstupních datech. Tento již existující algoritmus byl začleněn jako jádro výpočtu do nového GIS nástroje, který opakovanými interpolacemi střídanými s prostorovými dotazy výsledných gridů a vstupních dat postupně adaptoval výsledný grid tak, aby vyhovoval všem vstupním datům, tedy pravým i falešným bázím dané vrstvy známé z reinterpreтованých vrtů a z rozsahu povrchových výskytů daného souvrství. Zároveň tento nástroj průběžně upozorňoval na interpretované vrty, které obsahují odlehle hodnoty. Tyto vrty bylo následně nutno v průběhu interpolace manuálně zkontrolovat a interpretaci pak buď opravit, nebo vrt označit algoritmu jako nedůvěryhodný. Takto získaná interpolovaná rozhraní byla importována do MOVE ve formě gridů formátu Floating point TIF a následně v MOVE převedena na meshy.

Horninová tělesa byla vytvářena na základě četných konzultací modeláře s geology pracujícími v terénu i dalšími odborníky z řad zaměstnanců České geologické služby. Kromě těles hornin, která byla vyobrazena v archivních mapách a případně ověřena provedenými pracemi, byla do modelu vytvářena i tělesa zcela skrytá pod zemským povrchem. Vzhledem k velkému množství často podrobných povrchových geovědních dat bylo možné již v této etapě výzkumu expertním odhadem určit části modelovaného horninového prostředí, kde se určité horniny budou pravděpodobně vyskytovat v hloubce a velmi zhruba bylo možno odhadnout také generelní velikost a tvar jejich jednotlivých těles. Tato podpovrchová tělesa lze z hlediska konstrukce 3D modelu rozdělit do dvou skupin:

- Tělesa převzatá z vertikálních geologických řezů, kam je umístil geolog – autor konkrétního řezu.

- Tělesa vytvořená zcela mimo vertikální geologické řezy (vedle nich i pod nimi), která do prostoru konzervativně umístil modelář po konzultaci s terénním geologem.

V obou těchto případech se jedná o horninová tělesa doplněná čistě interpretativně, jejich doplnění do modelu je motivováno hlavně snahou zamezit mylnému výkladu, že v hloubce je hostující hornina ideálně homogenní, což by mohlo zkreslit návazné práce na dané lokalitě. Zároveň je však nutné tato tělesa brát s velkou mírou nejistoty, neboť jejich lokalizace i tvar jsou založeny pouze na expertní geologické extrapolaci povrchové stavby. Z těchto důvodů jsou hypotetická podpovrchová tělesa vytvářena ve zjednodušených tvarech a spíše větších velikostí, aby již na první pohled evokovala nejistotu s nimi spojenou.

Tvorba zlomů

Linie zlomů vyprojektované na zemský povrch byly použity pro tvorbu meshů zlomů, kdy byly jednotlivými liniemi proloženy plochy s nadefinovaným sklonem a orientací. Následně byly intersekční linie zlomů a báze modelu manuálně upraveny tak, aby odpovídaly smyslu pohybu na zlomech vyobrazeném na povrchové geologické mapě.

Zlomy byly vytvářeny jako obdélníkové plochy s hloubkovým dosahem cca $\frac{1}{2}$ délky zlomu na povrchu, pokud nebylo vnějším dostupným vertikálním geologickým řezem určeno jinak. Pokud nebyl sklon zlomů zřejmý z geologických řezů ani strukturních měření, pak byl předpokládán sklon získán konzultací s terénním geologem. Pokud nebylo možno sklon zlomu odhadnout, byl zlom vytvořen jako vertikální.

Zlomové plochy ve výsledném 3D geologickém modelu vždy vedou až na zemský povrch, ačkoli velmi pravděpodobně žádná z nich reálně neprotíná kvartérní sedimenty, téměř žádná tercierní vulkanity a jen část porušuje křídovou sedimentární sekvenci. Jejich vynesení až k povrchu je v modelu realizováno ze dvou důvodů:

- Pro lepší vizualizaci polohy a průběhu zlomů při obvyklém pohledu na 3D model shora.
- Kvůli nejistotě ohledně míry reaktivace zlomů v průběhu mladších období. Přestože např. litoměřická zlomová zóna vykazala v mladším paleozoiku výrazný vertikální pohyb řádu pravděpodobně vyšších stovek metrů, v mesozoiku i kenozoiku již byla výrazně méně aktivní a jednotlivé zlomové plochy této zóny často zřejmě nezaznamenaly prakticky žádný mladší pohyb. Určitá míra pohybu je však z celkového průběhu interpolovaných sedimentárních vrstev zjevná, nelze však rozlišit na které / kterých ze všech existujících zlomových ploch k těmto omezeným mladším pohybům došlo.

Pravidla modelování

V průběhu celého modelovacího procesu bylo při tvorbě litologických hranic aplikováno obecné geologické pravidlo: mladší litostratigrafické jednotky přetínají starší jednotky. Pokud jde o zlomy, nelze použít tyto vztahy z důvodu opakované reaktivace jednotlivých zlomových ploch během dlouhé křehce tektonické historie této lokality, sahající až do cca 550 milionů let vzdálené minulosti.

Nejdříve byla vytvořena zlomová síť metodou extruze povrchového průběhu zlomů podle sklonu odhadnutého pro každý zlom zvlášť. Modelovaná zlomová síť byla poté použita jako jedno z omezení při modelování sousedících horninových těles. Modelování geologických těles bylo prováděno třemi zásadně odlišnými přístupy:

1. Tercierní vulkanické žíly a přírodní dráhy byly modelovány jako subvertikální lokalizované válcovité nebo deskovité struktury, které podle interpretace specialisty - geologa z ČGS přetínají všechny ostatní horniny.
2. Permokarbonské, křídové a tercierní sedimenty, vulkanoklastika a výlevné vulkanity byly modelovány jako subhorizontální až mírně ukloněné povrchy s pomocí hloubkových dat z reinterpretovaných vrtů a z povrchových hranic mapového rozsahu odpovídajících jednotek.
3. Krystalinické jednotky představují litologicky variabilní prostředí, od méně deformovaných rigidních okatých ortorul až po silně polyfázově duktilně deformované fylity a svory. Hranice

těchto geologických těles byly modelovány ručně a individuálně, na základě odborného posouzení geologické pozice a strukturních údajů z okolí jednotlivých těles.

Pohyby na zlomech byly v modelu vytvořeny pouze v místech, kde pohyb indikovala povrchová geologická stavba nebo výraznější skok v průběhu interpolovaných sedimentárních vrstev. To neznamena, že na ostatních zlomových plochách v modelu nedošlo k výraznějšímu pohybu, ovšem pro odhad takového pohybu není při současném rozsahu znalostí dostatek přesvědčivých dat.

Nejistoty modelů

3D geologické modely jsou často vytvářeny z nejednoznačných a nepřesných dat, která jsou při sběru a interpretaci předmětem šíření chyb. Dále jsou data často heterogenní a nedostatečně pokrývají zájmové území, takže modelář při tvorbě modelu závisí na interpretaci založené na nějaké generalizované koncepci geologického vývoje dané oblasti, např. předpokladu konkrétního tektonického režimu nebo stylu deformace v modelované oblasti. Kromě malých modelů ložisek nerostných surovin nejsou tyto nejistoty často vyhodnocovány ani prezentovány uživatelům a zúčastněným stranám, protože v současné době neexistuje žádný standardizovaný publikovaný přístup k vyčíslení nejistot pro obdobně složité a plošně rozsáhlé modely se srovnatelně variabilními zdrojovými geovědními daty.

V případě tohoto projektu jsou nejistoty modelu způsobeny chybami v datech, nedostatkem údajů a metodikou modelování. Tyto chyby dat se vztahují k různým měřítkům zpracování, chybám projekce a digitalizačním chybám geologických map. Kromě toho byly zdrojové archivní mapy vytvořeny různými geology, kteří měli různé odborné názory na geologickou genezi modelovaného území. K důkladnému ověření litologických hranic nebo zlomové sítě podrobným geologickým mapováním napříč celou modelovanou oblastí nikdy nedošlo. Nepřesnosti hranic modelových jednotek se také vztahují k nepřesnosti zlomové sítě. Použitá zlomová síť byla vytvořena jako kompilace všech dostupných tektonických interpretací a map různých měřítek, podpořená nově provedenou podrobnou strukturní dokumentací skalních výchozů. Každý jejich autor měl však opět odlišný názor na celkový křehce tektonický vývoj dané lokality, a proto se archivní mapy zlomové sítě neshodují s výslednou mapou využitou pro tvorbu 3D modelu. Sklon zlomu, smysl a magnituda pohybu mohly být pro většinu zlomů určeny pouze expertním odhadem.

Ani současné velmi podrobné pokrytí modelované oblasti vrtnými daty neumožňuje vytvoření zcela přesného a správného geologického modelu pro dané území. To je dáno hlavně složitostí geologické stavby, v kombinaci s relativně malým hloubkovým dosahem vrtů a velmi variabilní kvalitou archivních geologických popisů vrtných jader.

Terénní mapovací práce provedené pro tento projekt přinesly podrobné informace zejména o povrchových a připovrchových partiích 3D modelu, avšak o hloubkové úrovni potenciálního tepelného výměníku přinesly jen nepřímé údaje. Z povrchových výzkumů a archivních dat lze tedy jen hrubě odhadnout průběh litologických hranic a malé části zlomů v této hloubce. Průběh většiny zlomů v této hloubce je zde jen kvalifikovaně odhadnut, a tedy nepřesně lokalizován, dále chybí informace o mocnosti a charakteru všech zlomů v této hloubce. Proto je nutné se stávajícím 3D strukturně-geologickým modelem pracovat jako s expertním konceptuálním odhadem hloubkové geologické stavby, ne jako s přesným, natož úplným popisem geologické stavby do hloubky 5000m. Ani současná verze 3D modelu tedy není definitivní a bude dle potřeby nadále zpřesňována v závislosti na nově získávaných datech.

Popsatelnost a predikovatelnost geologické stavby lokality

Rozsah a kvalita vstupních dat

Ze starších podrobných dat pokrývá celé území geologická mapa ČR 1 : 50 000 (digitální mapa GeoČR50, z analogických tištěných map 1 : 50 000 se jedná o listy 02-41 Ústí nad Labem (Shrbený et al. 1990) a 02-43 Litoměřice (Domas 1990). V listokladu Křovák neexistují z modelovaného území žádné geologické mapy 1 : 25 000, v listokladu Gauss – Krüger je toto území naopak kompletně pokryto geologickými mapami 1 : 25 000: M-33–52-B-d Milešovka (Macák 1963), M-33–53-A-c Lovosice

(Shrbený et al. 1967) a M-33–53-A-d Litoměřice (Shrbený 1967). Díky tomuto mapování Českého geologického ústavu 1 : 25.000 vychází 3D strukturně-geologický model z jednotného mapového a datového souboru. Tento zdroj informací byl tudíž považován za relevantní základ celého modelu, ke kterému bylo přihlíženo v případě diskrepance dalších archivních geologických map z tohoto území. Dle terénních rekognoskací jsou tyto mapy z hlediska vymapování horninových těles dobré kvality, s přesností odpovídající jejich měřítku vyobrazují téměř všechna větší horninová tělesa, která byla nově terénními pracemi namátkově ověřována. Horší je kvalita vymapování křehkých struktur, kde byla část zlomů uvedena v těchto mapách na základě nově provedených výzkumů a reinterpretací archivních dat výrazně modifikována a některé zlomy byly nově přidány. Nejedná se přitom jen o menší struktury 2. a 3. kategorie, ale i o významné zlomy a zlomové zóny 1. kategorie. Nově provedené podrobné mapovací práce v kombinaci s interpretací nových i archivních zejména vrtných dat tedy významně přispěly ke zvýšení kvality geologického modelu, zejména ve zpracování zlomové sítě, která je pro geotermální zdroje jedním ze zásadních faktorů.

Z archivních zdrojů byla dále získána hloubková data v digitální i tištěné podobě. Tato data zahrnovala zejména vrtná data a geologické profily, archivní geofyzikální interpretace a strukturní data z povrchových výchozů. Vrtná data jsou celkově středního hloubkového dosahu a zároveň distribuována v celém území 3D modelu ačkoli částečně nehomogenně. Petrografické popisy jsou často nejednoznačné a jejich stratigrafické zařazení diskutabilní (během reinterpretace vrtných dat byla stratigrafie sedimentárních hornin alespoň z části opravována u více než poloviny ze zpracovávaných vrtů). Tato mnohoznačnost částečně odráží mírné lokální odlišnosti a nejistoty v určení litostratigrafické příslušnosti zastižených hornin, částečně také zřejmě nedostatečný petrografický a regionální přehled některých pracovníků, kteří popisy vrtných jader vytvářeli. Během zpracování dat pro tvorbu 3D strukturně-geologického modelu byly tyto nepřesnosti v rámci možností odstraněny. Množství těchto dat nebylo v průběhu nových výzkumů rozšířeno, neboť neproběhly žádné nové vrtné práce, archivní vrtná jádra jsou téměř z naprosté většiny skartována a nově provedená geofyzikální měření se týkala spíše geotermálního vrtu a jeho bezprostředního okolí, než celého území 3D modelu.

Česká geologická služba pro účely tvorby 3D geologického modelu nově a metodicky jednotně reinterpretovala celkem 3713 vrtů. Nejvyšší množství těchto vrtů (3242) má hloubkový dosah do 20m. Tyto mělké vrty obvykle nenesou informace o podzemní pozici geologických rozhraní, přesto jsou pro tvorbu 3D modelu užitečné a byly tedy reinterpretovány. Slouží jednak pro ověření správnosti povrchové geologické mapy v místech kde chybí povrchové výchozy hornin (tedy na většině území), a kde je úlomkové mapování omezeno vegetací (např. louky) nebo zástavbou. Dále byly použity jako tzv. falešné báze zastižených souvrství, kdy interpolační algoritmus použitý pro tvorbu povrchu jednotlivých rozhraní obdržel tyto vrty jako nepřímá vrtná data – jako minimální hloubky daných vrstev – tzv. falešné báze, které nesměl během interpolace překročit. Hlubších vrtů v rozmezí 20-100 m bylo v daném území v databázi Geofondu k dispozici celkem 359. Tyto vrty již často zastihly alespoň jedno geologické rozhraní a vzhledem k jejich vysokému počtu (6 vrtů na 1 km²) představovaly významný zdroj primárních dat pro interpolaci geologických hranic sedimentárních hornin. Díky průzkumným vrtům skrze českou křídovou pánev disponuje modelovaná oblast i nadstandardně vysokým počtem hlubších vrtů (100 vrtů v hloubkovém rozmezí 100 – 500m a 12 vrtů hlubších než 500m). Navíc je pokrytí území těmito vrtů poměrně homogenní, což významně zvyšuje věrohodnost výsledných interpolovaných povrchů sedimentárních litostratigrafických jednotek. V případě mělkých vrtů je totiž v případě interpretace křídových souvrství častým problémem velká podobnost jednotlivých litostratigrafických jednotek v sedimentárním záznamu křídové pánve v dané lokalitě. Častá absence hornin specifických pro daná souvrství (tzv. marker horizontů) pak často neumožňuje jednoznačné přiřazení vrtných popisů jediné litostratigrafické jednotce, a interpretace obzvlášť mělkých vrtů pak musí být v průběhu interpolací opakovaně manuálně opravována po konzultacích s geologem – specialistou na českou křídovou pánev. V případě interpolací pro tento 3D model kompletně proběhla celkem 3 kola těchto iterativních oprav, než bylo dosaženo konzistentního datasetu vrtných interpretací. V případě vrtů hlubokých řádově stovky metrů však tento problém obvykle odpadá. Vrtné jádro totiž často zachycuje takovou mocnost křídové sedimentární sekvence, že

buď přímo zastihlo alespoň jeden marker horizont jednoznačně přiřaditelný určité litostratigrafické jednotce, nebo alespoň popisuje tak mocný sled klastických křídových sedimentů, že z postupných změn v litologii lze často poměrně jednoznačně odvodit, kterým souvrstvím tento sled odpovídá a kde jsou jejich rozhraní.

Komplexita a extrapolovatelnost geologické stavby

Prostorové uspořádání horninových těles na modelované lokalitě je nutno rozdělit na prostředí krystalinika, teplického ryolitu, permokarbonských klastických sedimentů, křídových klastických sedimentů a terciérních vulkanitů s vulkanoklastiky. Poměrně rozsáhle jsou v povrchových partiích modelu zastoupeny kvartérní uloženiny. Samotné krystalinikum jakožto objemově nejvýznamnější jednotka 3D geologického modelu je složeno ze tří petrograficky odlišných jednotek: 1. ortorul a 2. pestrého litologického vývoje metamorfitů – obojí pravděpodobně saxothuringické provenience, a 3. monotónního vývoje metamorfitů bohemika. Každá z těchto jednotek vyžaduje mírně odlišný přístup k modelování v závislosti na míře podrobnosti znalostí o dané jednotce, jejímu stáří a genezi.

Ortoruly představují z hlediska 3D modelu homogenní těleso s téměř monoklinální foliací a jednoduchým mapovým průběhem, které lze věrohodně extrapolovat minimálně do hloubky vyšších stovek metrů. Pestrý vývoj krystalinika je z hlediska tvorby geologického modelu výrazně složitější. V měřítku vyšších stovek metrů zde dochází ke střídání poměrně odlišných typů metapelitů (fylitů až svorů), které dále obsahují desítky až stovky metrů dlouhá čočkovitá tělesa pestrých litologií protažená paralelně s foliací která zaznamenává minimálně dvě významné fáze duktilní deformace. Kontakty těchto pestrých hornin jsou dle geologických map i terénních indikací poměrně ostré, navíc částečně tektonizované drobnější křehkou tektonikou.

Z hlediska extrapolovatelnosti geologické stavby této lokality je pro GTE zásadní odhad hloubkového průběhu rozhraní svorů bohemika a metamorfních hornin saxothuringika. Tento kontakt upadá dle povrchových strukturních dat ze saxothuringického krystalinika pod středními až strmými úhly k východu, avšak na povrchu není nikde odkryt. Z toho důvodu je jeho pozice v modelu jen přibližná, daná generelním sklonem foliací v metamorfitech saxothuringika a jejich nejvýchodnějším výskytem známým na zemském povrchu. Střední až strmý sklon tohoto rozhraní je konzistentní se středním až strmým sklonem foliací svorů bohemika změřenými na třech vzorcích vrtného jádra z vrtu PVGT-LT1 z hloubek okolo 990m, kde však na rozdíl od povrchových dat není znám směr sklonu. Kvůli složité geologické stavbě modelovaného území, komplikované navíc četnými zlomy, nebylo možné odhadovat hlubší dosah některých hustotně kontrastních těles (např. ortorul) gravimetrickými modely.

Přesnější hloubkový průběh tohoto litostratigrafického rozhraní a pozici a sklon jednotlivých větví litoměřické zlomové zóny by bylo vhodné před započítáním rozsáhlejších vrtných prací ověřit a výrazně zpřesnit technickými pracemi, zejména geofyzikálním výzkumem zaměřeným na hloubky v řádu prvních km, případně doplněným jádrovým vrtem do hloubky alespoň 2 km, který by byl lokalizován na základě výsledků těchto geofyzikálních výzkumů a 3D modelu.

Území modelu je protínáno velkým množstvím zlomů a zlomových zón. Nejvýznamnější z nich je tzv. litoměřický zlom neboli litoměřická zlomová zóna. Dle archivních map i publikované literatury se nejedná o diskretní zlomovou plochu, ale o zónu distribuované křehké deformace mocnou minimálně vyšší stovky metrů. Na základě vývoje permokarbonských sedimentů je hlavní aktivita této zlomové zóny kladena do povariského období Paleozoika. Námi vytvořený 3D model křídových souvrství podložený interpolacemi z reinterpretovaných vrtných dat však ukazuje, že tato zlomová zóna vykazovala omezenou aktivitu tak v období křídý nebo mladším. Většina údajů o konkrétním průběhu jednotlivých zlomů nejen v této zlomové zóně, ale v celém 3D modelu, jsou nepřímé indikace často podpořené archivními mapovými podklady. Nově provedené terénní práce umožňují jen výjimečně na základě nepřímých indikací zhruba odhadnout sklon některých zlomů, jedná se však vždy jen o expertní odhad na základě přípovrchových nepřímých údajů.

Věrohodnost výsledného modelu

Zpracovávané území poskytuje dostatečné množství povrchových geologických dat k tvorbě 3D strukturně-geologického modelu. Geologický model lokality je zatížen větší mírou nejistoty zejména

v hlubších partiích, vzhledem k tomu, že až na vrt PVGT-LT1 další vrty v samotném území 3D modelu dosahují hloubek pouze do 500 m. V západní části modelu jsou krystalinické jednotky v připovrchové části dobře podloženy geologickými mapami, východní část krystalinika je v modelu zatížena vysokou mírou nejistoty neboť zde krystalinikum na povrch vůbec nevychází. Nově provedené terénní práce (Verner et al. 2019 – viz výstupy tohoto projektu) vedly k částečnému zpřesnění údajů o jednotlivých horninových tělesech a tektonických zónách 3D geologického modelu. Zároveň mírně přispěly k homogennějšímu pokrytí území 3D modelu terénními daty.

Hloubkový dosah krystalinických jednotek je vzhledem k absenci dostatečně podrobného a zároveň věrohodného gravimetrického modelu krystalinika složité předpovědět. Jejich kontakty jsou středně až strmě ukloněné k východu, což podporují i výsledky nově provedené strukturní dokumentace výchozů, zejména shodné orientace duktilních staveb v různých typech metamorfitů.

Foliace v metamorfovaných horninách v místech výchozů krystalinika v západní části 3D modelu upadají pod středními až strmými úhly k východu. Na dokumentovaných výchozech mají často téměř penetrativní charakter a poměrně jednoduchý průběh, což dovoluje jejich extrapolaci do hloubek minimálně vyšších stovek metrů. V pestrém vývoji metamorfitů saxothuringika se vyskytují četná čočkovitá tělesa pestrých hornin konformní s dominantní foliací. Obdobná tělesa jsou předpokládána v podpovrchových partiích, s četností a prostorovou distribucí obdobnou povrchové situaci. Konkrétní pozice a velikost jednotlivých podpovrchových čočkovitých těles je však pouze hypotetická.

Těleso teplického ryolitu a permokarbonské sedimenty jsou kromě povrchových partií doloženy jen malým počtem vrtů. Nelze proto vyloučit jejich výrazně rozsáhlejší výskyt než jak je vymodelován v aktuální verzi 3D modelu. Problémem tvorby těchto jednotek je těžko odhadnutelný průběh báze, která je erozivní a reflektuje silně zvlněný povrch intermontánního reliéfu erozních zbytků variského horstva v této době. Vrchní hranice těchto jednotek má také velmi nepravidelný průběh, neboť je postižena velmi dlouhým obdobím zvětrávání a denudace před začátkem sedimentace křídových souvrství.

Sedimentární výplň české křídové pánve je v modelovaném území podložena zcela dostatečným množstvím archivních vrtů a poměrně vysokou kvalitou povrchových geologických map. Díky tomu nebylo nutno křídové litostratigrafické jednotky extrapolovat, nýbrž interpolovat z tohoto rozsáhlého vstupního datasetu. Jak již bylo popsáno výše, interpolace probíhala iterativně, s využitím algoritmu vyvinutého speciálně pro tvorbu tohoto modelu a s manuální kontrolou a opravou vstupních dat mezi jednotlivými iteracemi.

Terciární vulkanity jsou modelovány částečně jako subvertikální deskovitá nebo kónická tělesa a částečně jako subhorizontální příkrovy tvořené směsí pevných výlevných hornin a málo soudržných vulkanoklastik. V obou případech je jejich průběh z velké části interpretativní, založený na konzultacích se zkušeným vulkanologem z České geologické služby, který v tomto regionu provádí dlouhodobé výzkumy.

Z hlediska zlomových struktur až na několik výjimek nelze na základě dostupných dat jednoznačně popsat mocnost ani charakter výplně jednotlivých zlomových struktur. Určení směru sklonu a sklonu jednotlivých zlomových ploch na lokalitě představuje velký zdroj nejistoty 3D modelu, která v tomto případě s hloubkou lineárně narůstá.

Z výše uvedeného lze shrnout, že 3D geologický model je od hloubky cca 500 m založen téměř výhradně na expertních odhadech. V hlubších částech modelu je pak distribuce horninových těles relativně věrohodnější, než předpokládaná lokalizace a orientace zlomových ploch.

Případná budoucí validace modelu může probíhat pomocí technických prací včetně vrtání, geofyzikálních výzkumů a průzkumů nebo podrobného geologického mapování nejvýznamnějších úseků modelované oblasti. Pokud taková nová data nebudou odpovídat modelu, bude muset být model podle nich opraven.

V rámci přípravy nabízených služeb bylo rovněž započato s vývojem metodických postupů a souvisejících algoritmů pro kvantifikaci a vizualizaci věrohodnosti geologických 3D modelů. Tato práce

však vyžaduje delší časový rozsah a nebylo možno ji plně rozvinout před dokončením samotného 3D geologického modelu. Proto v této zprávě nemohou být prezentovány výsledky těchto plánovaných prací.

Reference

- Anderson J., Strom A., Svemar CH., Almén K. E., Ericsson L. O. (2000): Technical report TR-00-12 – What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation – SKB, Stockholm, Sweden. Domas J. et al. (1990) Geologická mapa ČR, list 02-43 Litoměřice, 1 : 50 000. Ústřední ústav geologický, Praha
- Macák F. (1963) Základní geologická mapa České republiky 1 : 25 000, list M-33-52-B-d Milešovka – ČGS, Praha, 1 s.
- MLčoch, B. a Konopásek, J., 2010. Pre-Late Carboniferous geology along the contact of the Saxothuringian and Teplá-Barrandian zones in the area covered by younger sediments and volcanics western Bohemian Massif, Czech Republic. Journal of Geosciences, 55 2010:, 81–94. DOI: 10.3190/jgeosci.068
- Rajchl, M., Uličný, D. & Mach, K. 2008. Interplay between tectonics and compaction in a rift-margin, lacustrine delta system: Miocene of the Eger Graben, Czech Republic. Sedimentology 55, 1419–1447. DOI 10.1111/j.1365-3091.2008.00951.x
- Rajchl, M., Uličný, D., Grygar, R., and Mach, K., 2009. Evolution of basin architecture in an incipient continental rift: the Cenozoic Most Basin, Eger Graben Central Europe. Basin Research 21, 269-294. doi: 10.1111/j.1365-2117.2008.00393.x
- Shrbený O. (1967) Základní geologická mapa České republiky 1 : 25 000, list M-33-53-A-d Litoměřice – ČGS, Praha, 1 s.
- Shrbený O., Macák F., Müller V. (1967) Základní geologická mapa České republiky 1 : 25 000, list M-33-53-A-c Lovosice – ČGS, Praha, 1 s.
- Shrbený O. et al. (1990) Geologická mapa ČR, list 02-41 Ústí nad Labem, 1 : 50 000. Ústřední ústav geologický, Praha
- Uličný, D., Laurin, J., and Čech, S., 2009a. Controls on clastic sequence geometries in a shallow-marine, transtensional basin: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. Sedimentology, 56, 1077–1114. doi: 10.1111/j.1365-3091.2008.01021.x
- Uličný, D., Špičáková, L., Grygar, R., Svobodová, M., Čech, S. & J. Laurin, J., 2009b: Palaeodrainage systems at the basal unconformity of the Bohemian Cretaceous Basin: roles of inherited fault systems and basement lithology during the onset of basin filling. Bulletin of Geosciences, 84, 4, 577-610. doi: 10.3140/bull.geosci.1128.
- Žáček V., Škoda R. (2009): Petrology of crystalline rocks in the geothermal borehole GTPV-LT1 in Litoměřice. Geoscience Research Reports for 2008, 205-212. Czech Geological Survey, Prague

Digitální zdroje:

- Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) – Český úřad zeměměřický a katastrální, 2016.
- Geologická mapa ČR 1 : 50 000 (WMS ČGS 2014). Česká geologická služba. [online]. Dostupné z: http://mapy.geology.cz/geocr_50/