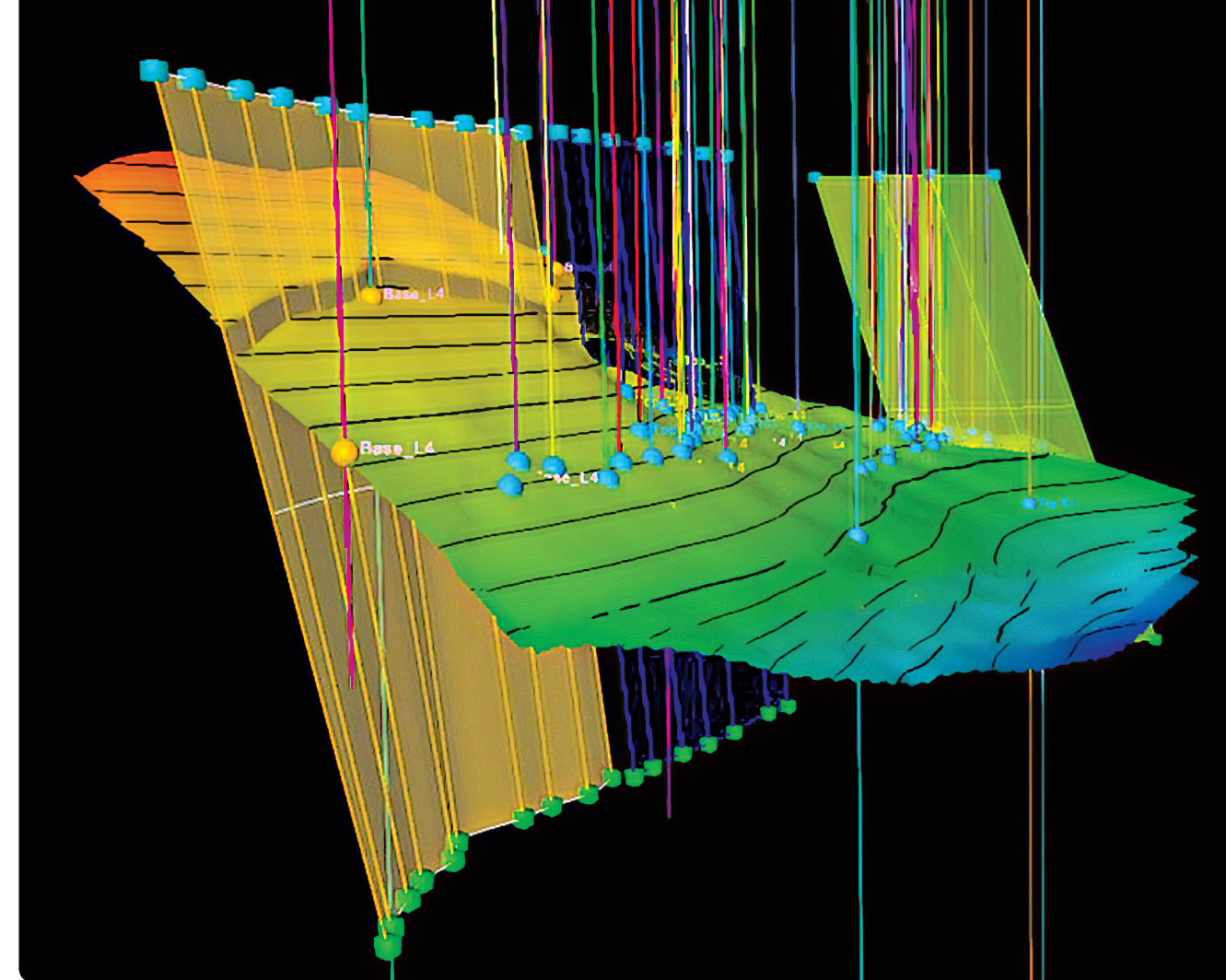


Příprava výzkumného pilotního projektu
geologického ukládání CO₂ v České republice



Příprava výzkumného pilotního projektu
geologického ukládání CO₂ v České republice

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA O ŘEŠENÍ PROJEKTU REPP-CO2

Vít Hladík
Oldřich Krejčí
Juraj Franců
Roman Berenblyum

Eric P. Ford
Jiří Sedlák
Vladimír Kolečka
Martin Klempa

PRAHA 2017



Příprava výzkumného pilotního projektu geologického ukládání CO₂ v České republice

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA O ŘEŠENÍ PROJEKTU REPP-CO2

Autoři: Vít Hladík (Česká geologická služba)
Oldřich Krejčí (Česká geologická služba)
Juraj Franců (Česká geologická služba)
Roman Berenblyum (IRIS)
Eric P. Ford (IRIS)
Jiří Sedlák (Miligal, s. r. o.)
Vladimír Kolejka (Česká geologická služba)
Martin Klempa (Vysoká škola báňská –
Technická univerzita Ostrava)

Spolupracovali: Patrik Fiferna, Aleš Havlín, Eva Hudečková, Jana Janderková,
Lukáš Jurenka, Zuzan Krejčí, Pavel Müller, Martin Paleček,
Miroslav Pereszlényi, Ondřej Prokop, Zuzana Skácelová
(Česká geologická služba)

Lars Kollbotn, Anders Nerموen, John Zuta (IRIS),
Petr Bujok, Michal Porzer, Naďa Rapantová, Jindřich Šancer
(Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava)

Václava Havlová, Martin Klajmon, František Štván
(ÚJV Řež, a. s.)

Petr Špaček, Josef Havíř
(Ústav fyziky Země Masarykovy univerzity v Brně)

Jitka Mikšová
(Centrum výzkumu Řež, s. r. o.)

Editor: Petr Maděra (Česká geologická služba)

Layout: Oleg Man (Česká geologická služba)



1. Úvod

Projekt REPP-CO₂, plným názvem „Příprava výzkumného pilotního projektu geologického ukládání CO₂ v České republice“, je jedním ze čtyř projektů podpořených grantem z Norska v rámci programu CZ08 „Zachycování a ukládání oxidu uhličitého“ Norských fondů 2009–2014¹. Jeho hlavním cílem bylo významným způsobem přispět k rozvoji technologie geologického ukládání CO₂ v České republice.

1.1 Geologické ukládání CO₂ a technologie CCS

Geologické ukládání CO₂ je koncovým článkem technologického řetězce CCS (zachytávání a ukládání CO₂), jedné z významných technologií pro snížení emisí skleníkových plynů vznikajících při spalování fosilních paliv (obr. 1-1).

geologických struktur vhodných pro potenciální uložení CO₂ a transpozici příslušné evropské legislativy – viz zákon č. 85/2012 Sb., o ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur⁴.

Přestože CCS nepatří v současné době mezi priority rozvoje průmyslu a energetiky v ČR, význam této technologie může výrazně vzrůst v souvislosti s probíhající evropskou diskuzí o závazných cílech evropské klimatické a energetické politiky do roku 2030⁵ a přechodu k nízkouhlíkové společnosti do roku 2050⁶. Evropská komise v rámci této diskuze požaduje zpracování národních dekarbonizačních plánů, které budou obsahovat strategii jednotlivých členských států pro snížení emisí skleníkových plynů. Pro dekarbonizaci české ekonomiky může být technologie CCS významná jak pro sektor energetiky (v případě, že bude i po roce 2030 částečně využívat fosilní paliva, což je pravděpodobné), tak pro



Obr. 1-1 Princip geologického ukládání oxidu uhličitého.

CCS je jednou ze strategických energetických technologií Strategického energetického technologického plánu Evropské unie (SET-plan²) a hraje významnou roli v evropské strategii přechodu k nízkouhlíkové společnosti³. V ČR se dosavadní aktivity v oboru CCS soustředily na projekty výzkumu a vývoje, včetně mapování

některá odvětví průmyslové výroby (např. výroba oceli, cementu, některá odvětví chemické výroby), kde je CCS de facto jediným technickým řešením pro výrazné snížení emisí CO₂.

Výzkum v oboru CCS jako strategickou investicí do budoucnosti bere v úvahu i Státní energetická kon-

1 <http://www.eeagrants.cz/cs/programy/norske-fondy-2009-2014/cz08-zachycovani-a-ukladani-co2>

2 European Strategic Energy Technology (SET)-Plan – <http://setis.ec.europa.eu/technologies>

3 viz např. sdělení Evropské komise „Plán přechodu na konkurenceschopné nízkouhlíkové hospodářství do roku 2050“ – <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52011DC0112>

4 <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=24080>

5 https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en

cepce ČR⁷, která problematiku geologického ukládání oxidu uhličitého řadí mezi podporované směry výzkumu, vývoje a inovací v oblasti účinnějšího využívání fosilních zdrojů energie.

1.2 Projekt REPP-CO2 a jeho cíle

Přínos projektu REPP-CO2 k rozvoji geologického ukládání CO₂ v České republice spočíval v posunu úrovně technologické připravenosti (TRL⁸) této technologie v českém národním prostředí z úrovně TRL 4 (technologie ověřená v laboratoři) na úroveň TRL 5 (technologie ověřená v relevantním prostředí). Pro geologické ukládání CO₂ znamená TRL 5 jeho ověření formou pilotního projektu na konkrétní geologické struktuře obdobného typu jako případná budoucí úložiska průmyslového měřítka.

Dílčí cíle projektu odrážejí klíčové přínosy, kterých bylo při realizaci projektu dosaženo. Tyto cíle jsou:

- 1/ Posoudit vybranou geologickou strukturu (vytěžená ložiska ropy⁹) jako potenciální úložnou strukturu pro výzkumný pilotní projekt geologického ukládání CO₂, a to s využitím metodického postupu podle zákona č. 85/2012 Sb., o ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur.
- 2/ Posílit česko-norskou spolupráci v oboru geologického ukládání CO₂ a s ním spojeného výzkumu a vývoje.
- 3/ Otestovat metodiku, postupy a kritéria pro popis a posuzování plánovaného úložného komplexu pro CO₂, stanovené zákonem č. 85/2012 Sb., o ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur, v reálných podmínkách při přípravě konkrétního úložiska.
- 4/ Realizovat geologické modelování úložiska a následnou numerickou simulaci injektáže CO₂.
- 5/ Provést rizikovou analýzu úložiska, včetně posouzení střetů zájmů, návrhu opatření na snížení rizik a sestavení monitorovacího plánu úložiska.
- 6/ Nově posoudit potenciál horninových struktur karpatské soustavy v ČR z hlediska možností ukládání CO₂.
- 7/ Zvýšit odbornou kapacitu českých výzkumných institucí zapojených do projektu prostřednictvím metodického výzkumu, výměny informací a vzájemného učení s norským partnerem.
- 8/ Zvýšit povědomí a úroveň znalostí odborné i laické veřejnosti o technologii CCS a geologickém ukládání CO₂.

⁶ https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en

⁷ <https://www.mpo.cz/dokument158059.html>

⁸ TRL – Technology Readiness Level ve smyslu definice pro evropský rámcový program Horizon2020 – viz http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf

⁹ Po obsáhlých diskuzích se zainteresovanými subjekty bylo vybráno vytěžené ropné ložisko LBr-1 na jihovýchodní Moravě.

1.3 Struktura projektu

Projekt REPP-CO2 byl rozdělen do 10 hlavních, na sebe navazujících a navzájem propojených aktivit (viz obr. 1-2). Aktivity 1–5 odpovídají hlavním kritériím pro popis a posuzování plánovaného úložného komplexu a okolní oblasti, tak jak jsou definována v §26 zákona č. 85/2012, o ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur, konkrétně v definici příslušné nové přílohy k zákonu č. 62/1988, o geologických pracích. Tyto aktivity se přímo vztahují k přípravě pilotního výzkumného projektu geologického ukládání CO₂ ve vybrané lokalitě, na vytěženém ložisku ropy LBr-1 na jihovýchodní Moravě.

Aktivita 6 byla zaměřena na širší souvislosti připravovaného pilotního projektu, a to jednak z hlediska jeho dalšího vývoje (možné zdroje CO₂, střety zájmů, dopravní scénáře), jednak z hlediska možností budoucího širšího rozvoje technologie CCS v ČR, který je mimo jiné podmíněn dostatečnou úložnou kapacitou potenciálních úložisk.

Aktivita 7 se soustředila na metodický výzkum ve vybraných klíčových oblastech charakterizace a posuzování úložisk. Aktivity 8–9 byly věnovány publicitě, šíření informací a vzdělávání. Do Aktivity 10 byl vyčleněn management, organizace a řízení projektu, včetně podpůrných administrativních aktivit.

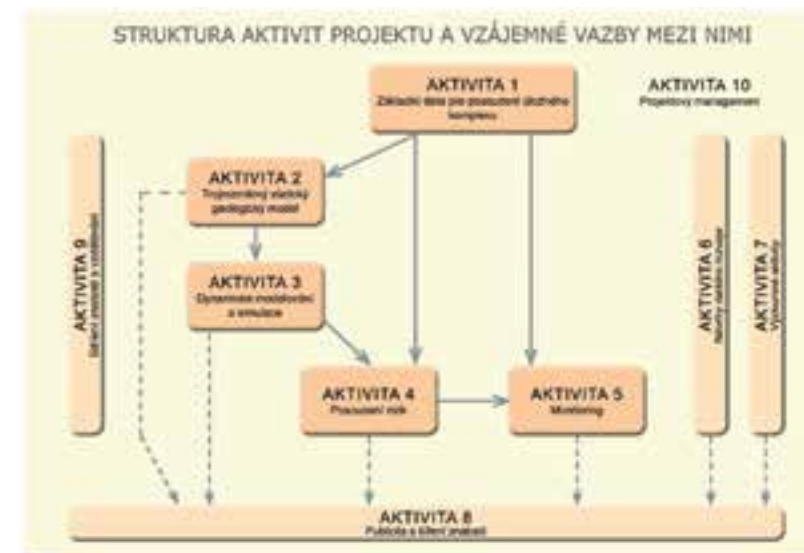
Výše uvedené členění projektu bylo zachováno i ve struktuře této závěrečné zprávy.

Realizaci projektu zajišťovalo projektové konsorcium pod vedením České geologické služby. Dalšími členy bylo 5 výzkumných institucí a podniků z ČR a jedna výzkumná organizace z Norska. Složení konsorcia je uvedeno v tab. 1-1.

Projekt byl zahájen v lednu 2015 a dokončen v listopadu 2016. Při jeho řešení, které bylo rozděleno do 10 aktivit a 54 úkolů, bylo zpracováno celkem 106 výstupů, vesměs ve formě textových zpráv, v některých případech doplněných datovými nebo grafickými soubory. Na řešení projektu se podílelo 134 výzkumných pracovníků a techniků ze 7 institucí.

1.4 Projektová pilotní lokalita – ložisko LBr-1

Ložisko LBr-1 se nachází v české části Vídeňské pánve, poblíž města Lanžhot u hranic se Slovenskou republikou (viz obr. 2-4). Jde o severní část bývalého ložiska ropy a zemního plynu Brodské, jehož moravská část byla po rozdělení Československa pojmenována Lanžhot-Brodské (číslo ložiska ČGS-Geofond 3241900). Plocha



Obr. 1-2 Struktura aktivit projektu a vzájemné vazby mezi nimi.

Tab. 1-1 Složení projektového konsorcia (při popisu činnosti a příspěvků jednotlivých partnerů jsou v této zprávě používány jejich akronymy uvedené v této tabulce)

	Název partnera	Typ organizace	Akronym
Příjemce grantu	Česká geologická služba	Státní příspěvková organizace ze zákona	ČGS
Partner 2	International Research Institute of Stavanger	Akciová společnost – výzkumná instituce	IRIS
Partner 3	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava	Veřejná vysoká škola	VŠB
Partner 4	ÚJV Řež, a.s.	Akciová společnost	ÚJV
Partner 5	Centrum výzkumu Řež s.r.o.	Společnost s ručením omezeným – výzkumná instituce	CVŘ
Partner 6	Masarykova univerzita – Ústav fyziky Země	Veřejná vysoká škola	ÚFZ
Partner 7	Miligal, s.r.o.	Společnost s ručením omezeným	Miligal

tohoto ložiska byla pokryta dobývacím prostorem 40010 „Lanžhot I“. Hlavní objem těžby uhlovodíků spadá do období 1959–1969, ale sporadické dotěžování ropy pokračovalo až do roku 2001 (evidovaná těžba ve výši 200 t ropy). Operátorem ložiska byly Československé naftové doly, dnešní MND, a. s. V roce 2004 požádal operátor ložiska o odpis zásob, čímž de iure prohlásil ložisko za vytěžené. V roce 2016 byl pak rozhodnutím Českého báňského úřadu zrušen dobývací prostor.

Hlavním ropo- a plynonosným obzorem ložiska jsou pisky středního badenu, stratigraficky odpovídající tzv. lábskému obzoru. Obzor se nachází v hloubce kolem 1 000 m pod povrchem a vyznačuje se velmi dobrými kolektorskými vlastnostmi. Právě to z něj, spolu s dobrou prozkoumaností a přítomností kvalitní těsnicí horniny – jílovců středního badenu – v nadloží, dělá vhodnou rezervoárovou strukturu pro potenciální úložiska oxidu uhličitého.

Zájmová struktura má protáhlý tvar ve směru přibližně sever jih a není plošně příliš rozsáhlá. Její delší rozměr dosahuje cca 3,5 km a šířka nepřesahuje 500 m. Pro potřebu pilotního úložiska CO₂ jsou však uvedené rozměry více než dostačující.

Podrobnější popis lokality je uveden v kapitole 2.

1.5 Úvodní poznámky k odborným kapitolám závěrečné zprávy

Následující kapitoly zprávy popisují výsledky projektu dosažené při řešení jednotlivých aktivit (viz obr. 12), jejichž vedoucí jsou zároveň zodpovědnými autory příslušných kapitol:

- Vít Hladík (ČGS) – kapitoly 1, 9, 10, 11 a 12
- Oldřich Krejčí (ČGS) – kapitola 2
- Juraj Franců (ČGS) – kapitola 3
- Roman Berenblyum (IRIS) – kapitola 4
- Eric P. Ford (IRIS) – kapitola 5
- Jiří Sedlák (Miligal) – kapitola 6
- Vladimír Kolejka (ČGS) – kapitola 7
- Martin Klempa (VŠB) – kapitola 8

Jednotlivé kapitoly obsahují shrnutí provedených prací a popis nejdůležitějších dosažených výsledků. Ty jsou v některých případech, zejména pokud v rámci dané aktivity vznikly rozsáhlejší soubory nových poznatků a dat, doplněny příklady konkrétních výsledků či výstupů. Podrobný popis provedených prací a jejich výsledků je obsažen v projektových výstupech. V závěru každé kapitoly je zařazen soupis všech výstupů, které se k popsané problematice vztahují.

2. Základní údaje pro posouzení úložného komplexu

2.1 Geologie Vídeňské pánve

Základní ucelenou modelovou představu o stavbě a terciálním vývoji Západních Karpat (ZK), jejichž součástí Vídeňská pánev je, podal v širokém regionálním rámci Roth (1980). Práce vycházela, vedle důkladné syntézy všech regionálních geologických a geofyzikálních dat, také z důkladné analýzy tehdejších naměřených paleomagnetických údajů v rámci alpsko-karpatského blokového systému (Krs – Roth 1979). Jedním z nejvýznamnějších přínosů této práce bylo první postulování hypotézy střednomiocenního levostranného posunu v prostoru západního okraje magurského flyšového pásma a okraje centrálních Karpat a tím naznačení rozsáhlého miocenního vysunutí karpatsko-panonských bloků k S a SV.

Roth (1980) však nebyl odbornou veřejností zcela doceněn, a tak za průkopnickou práci je obvykle považována studie Burchfiela a Roydenové (1982), kde je zobrazena generalizovaná mapa intra-karpatských pánví s vyznačením hlavních zón extenze. Některé z těchto pánví, jako je např. středno- až svrchnomiocenní výplň Vídeňské pánve (jež jsou předmětem zájmu projektu REPP-CO2), vznikly mechanismem „pull-apart“. Na území ZK v ČR byly poté tyto horizontální posuny studovány řadou autorů a postupně byly dokládány jak strukturně-geologickými (Fodor 1995, Fodor et al. 1995, 1996, 1999), tak geofyzikálními metodami (Hubatka – Krejčí 1996).

Během této poslední fáze vývoje orogénu (svrchní oligocén – střední miocén) pak dominovala šikmá kontinentální kolize (transprese, transtenze) mezi blokovým systémem centrálních Západních Karpat, unikajícím (escape) laterálně z kolizní zóny mezi jv. okrajem severoevropské platformy a okrajem formujících se Východních Alp k východu do prostoru pánví flyšového pásma ZK (Tomek et al. 1987). Teorii kolize Východních Alp s okrajem severoevropské platformy představili Ratschbacher a Merle (1991), Ratschbacher et al. (1991) a Spernerová et al. (2002). Přehledná geologická mapa celé Vídeňské pánve je na obr. 2-1, příslušná litostratigrafická kolonka pak na obr. 2-2.

Závěrečná etapa extenze, rozpadu orogénu a tvorba neogenních pánví úzce souvisela i s interakcí astenosféry a litosféry. V rámci analýzy závěrečného extenzního stadia východoalpsko-karpatsko-panonské oblasti byly publikovány již stovky prací. Z novějších publikací považujeme za nutné se zmínit o pracích Kováče et al. (2002), Zoetemeijerové et al. (1999), z novějších pak Deckera et al. (2005), Hinsche et al. (2005), Hölzelové et al. (2010) a Beidinger a Deckera (2016). Regionální geologie Vídeňské pánve, včetně rakouské a slovenské části a její uhlvodíkový potenciál popsali Picha et al. (2006) a Arzmüller et al. (2006). Seismický průzkum 3D z okolí bývalého ložiska LBr-1 zpracovali Prochác et al. (2002).

Přehledné mapové podklady z prostoru celé Vídeňské pánve publikovali Kröll et al. (1993).

2.2 Historie průzkumných a těžebních prací na ložisku Brodské

Hlubinný průzkum ložiska Brodské začal v jeho jižní části (dnes na území Slovenska) už koncem 1. světové války prvním průzkumným vrtem Brodské-1 v roce 1917. Průzkumné práce dále pokračovaly v letech 1927 a 1928 (Brodské 2 a 3). Větší objem průzkumných prací byl proveden během 2. světové války, kdy byla odvrtna řada mělkých vrtů a byl proveden tíhový a seismický průzkum. Tyto mělké průzkumné práce poskytly detailní podklady pro hlubinný průzkum ložiska a dále zjistily zlomově uzavřenou strukturu v panonských sedimentech při styku brodského a farského zlomu. Vrt Brodské-4 v letech 1949 až 1950 navrtal v sedimentech středního badenu roponosný obzor, jehož průzkum a těžební otvírka trvaly až do roku 1964. První výsledky průzkumu se uvádí ve zprávách Bílka (1953a, b) a Šelleho (1959). Výpočet zásob je od Šelleho et al. (1960).

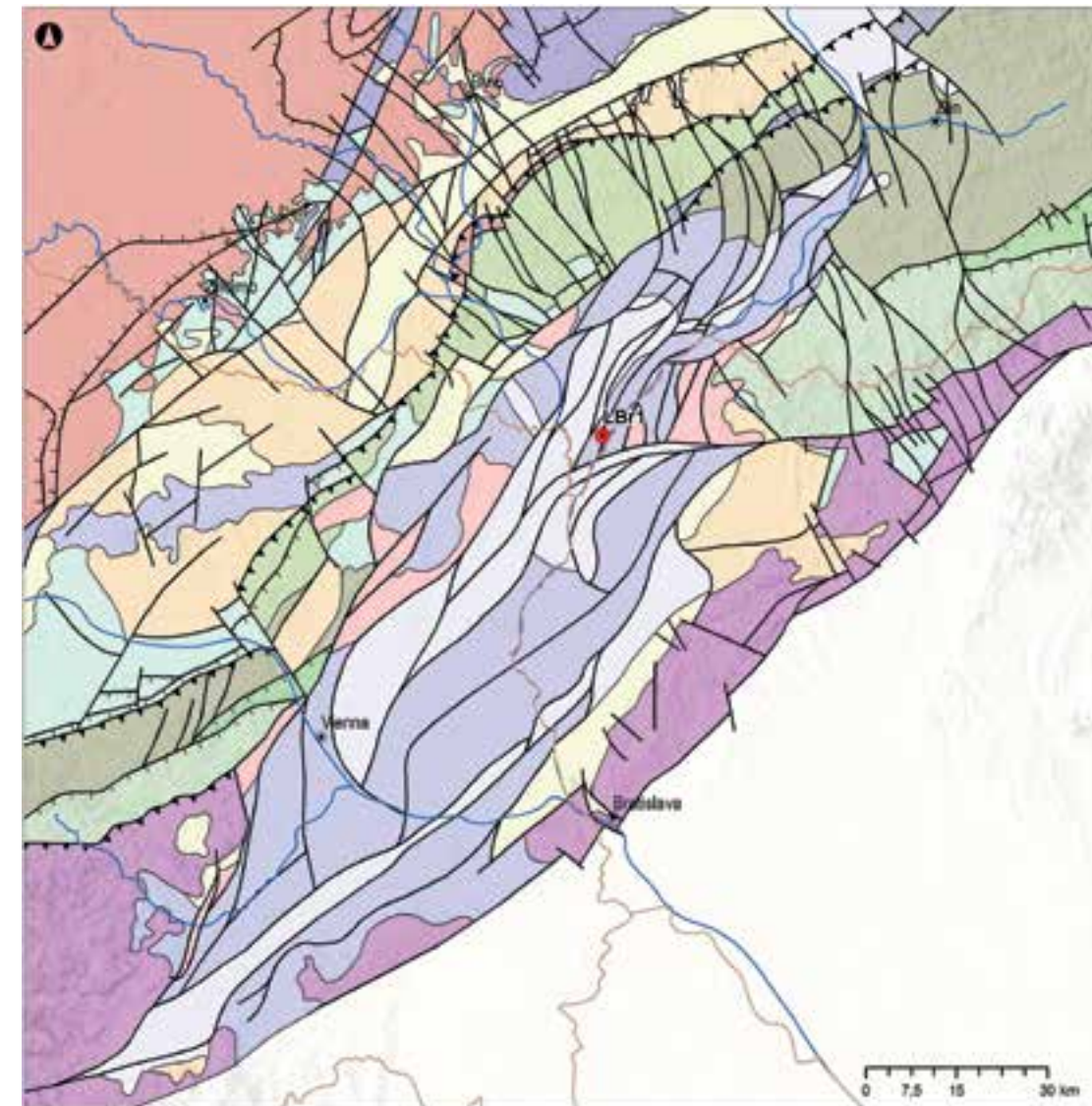
V severní části ložiska (struktura LBr-1) byl prvním pozitivním vrtem vrt Br-45, realizovaný v r. 1957. Do roku 1960 zde bylo vyhloubeno dalších 22 průzkumných a těžebních vrtů, které zastihly zájmový ložiskový obzor.

V roce 1962 byl na základě analýzy celkové stavby ložiska obnoven hlubinný průzkum na tzv. vysoké kře brodského zlomu (na slovenském území, viz kap. 2.4). Ve středním badenu zde byl zjištěn litologicky ohraničený obzor, jehož plochu ověřily do konce roku 1964 průzkumné (Hromec – Kolesík 1964) a těžební vrty (Fiala 1964 a 1966).

2.3 Údaje o lokalitě

V rámci projektové Aktivita 1 byly shromážděny a zpracovány základní geografické a geologické údaje o lokalitě. Byly k tomu využity podklady z rezortních mapových zdrojů, data z databázi ČGS-Geofondy i dřívějšího operátora ložiska. Z mimorezortních zdrojů byla použita data institucí Ministerstva zemědělství (půdní mapy) a Českého úřadu zeměměřického a kartografického (ZABAGED, LIDAR, ortofoto). Veškerá získaná data (obdobně jako všechna ostatní data shromážděná, naměřená nebo jinak vytvořená v rámci projektu) byla průběžně ukládána do projektové geodatabáze, která byla zřízena v rámci Aktivita 10. Aby projektová data měla jednotný geografický rámec, byl při zahájení úkolu definován základní souřadnicový systém (S-42), do kterého byla veškerá data v rámci projektu převáděna.

Zásadní význam pro další práce zaměřené na posouzení geologické struktury jako potenciálního úložiště



ZÁPADNÍ KARPATY A VÝCHODNÍ ALPY KARPATSKÁ PŘEDHLUBĚNÍ A VÍDEŇSKÁ PÁNEV

pliocén
piemon
sarmat
badén
karpát
eggenburg – othang

FLYŠOVÉ PÁSMO

pouzifská jednotka
wenčberská a žilnická jednotka
slézská jednotka
grafensteinská a ruzárská jednotka
kallertberská a bystřická jednotka
laboká a bílkozupatská jednotka
jednotky centrálních Karpat a V Alp

ČESKÝ MASIV

palaeozoikum, neoborné
krytozoikum, neoborné
zlom
příkrov I. řádu
příkrov I. řádu zakrytý
příkrov II. řádu
hranice litostratigrafických jednotek

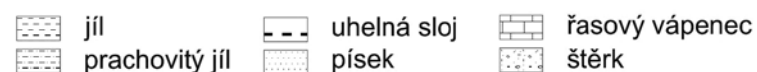
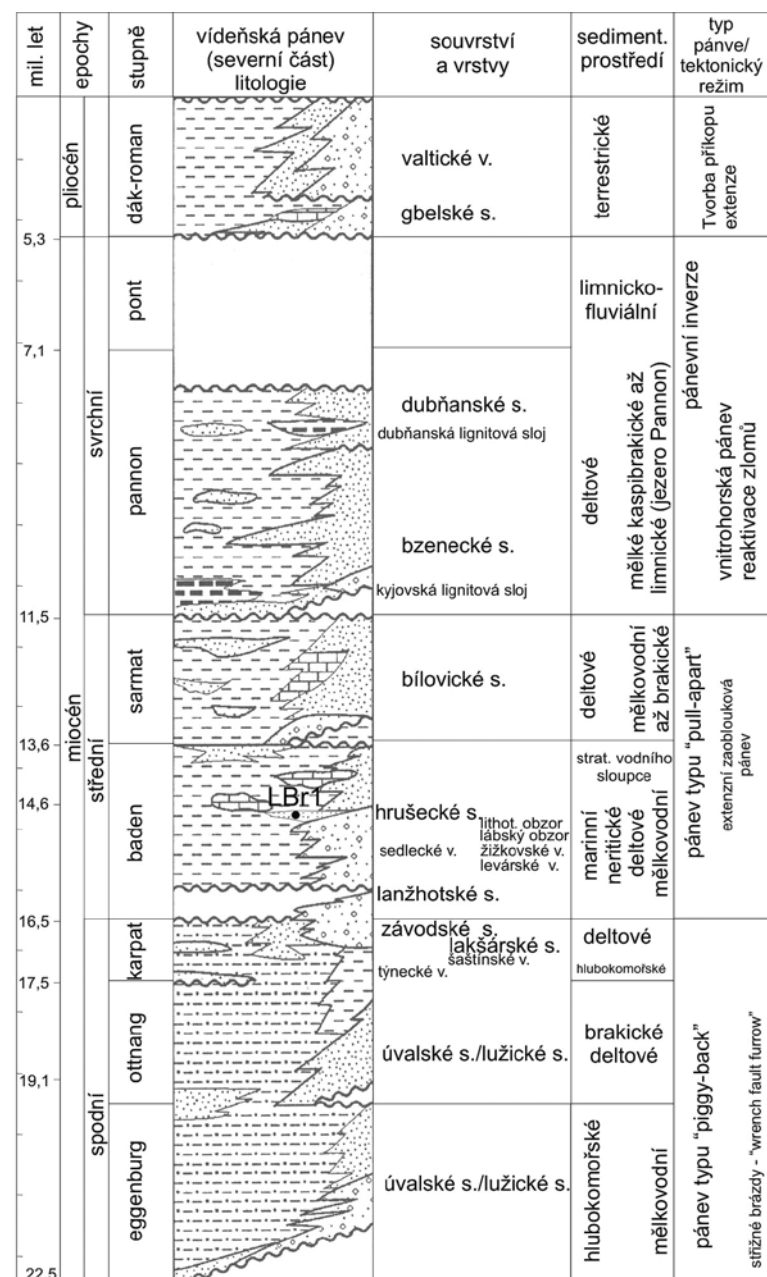
mají údaje o vrtech, kterých v širší oblasti ložiska Brodské existuje 103. V úvodní fázi projektu byla shromážděna data o souřadnicích všech vrtů, včetně nadmožské výšky ústí a celkové hloubky. Údaje byly následně verifikovány a uloženy do geodatabáze, kde byly k dispozici pro další využití, včetně tvorby geologického modelu v Aktivitě 2.

Samostatně byl zpracován digitální model reliéfu terénu (DMR) pro zájmové území projektu, který byl využit jako vstupní datový soubor pro statický geologický mo-

del úložného komplexu v Aktivitě 2. DMR byl vytvořen z dostupných výškopisných dat (kótované body polohopisu, data LIDAR) a byl zahrnut do struktury projektové geodatabáze.

Byla rovněž zpracována geografická a pedologická charakteristika lokality (výstup V1.3), jejíž výsledky byly vstupním podkladem pro posouzení expozice a účinků případného úniku CO₂ z úložiště v rámci rizikové analýzy (Aktivita 4). Výsledky byly rovněž využity při tvorbě

Obr. 2-1 Přehledná geologická mapa celé Vídeňské pánve s umístěním lokality LBr-1.



lokalita zasahuje do ochranných pásem, chráněných území a objektů kulturních památek a byly zhodnoceny možné interakce s činnostmi v okolí úložiště.

V průběhu řešení projektu byla postupně doplněna některá nově získaná data, jako např. informace o starých vrtech, které byly vrtány v období 1944 až 1948 s hloubkou 50 až 210 m. Tyto vrty (celkem 23 objektů), které nebyly kvalitně zlikvidovány, byly dále vyhodnoceny v Aktivitě 4 jako potenciální rizikový prvek. Dále byly zajištěny údaje o dalších 2 vrtech na průzkum lignitu, které jsou uvnitř hodnocené oblasti a byly vrtány v letech 1960 a 1984.

Zvláštní pozornost byla soustředěna na získání informací a dat o likvidaci starých průzkumných a těžebních vrtů z 60. a 70. let a o relikvidaci některých z nich v rozmezí let 1998–2015. Práce prováděl Palivový kombinát Ústí, s. p. (PKÚ), a k jednotlivým likvidovaným sondám zpracovával dokumentaci, která byla průběžně pro řešení projektu k dispozici.

Jako modelový případ bylo provedeno porovnání průvodní zprávy o likvidaci vrtu Br-72, provedené firmou MND v červenci 1960, s relikvidací tohoto vrtu firmou PKÚ Ústí nad Labem ze srpna 2015 (obr. 2-4). Oba způsoby provedení dokumentuje Závěrečná zpráva o relikvidaci tohoto vrtu (Kožík 2015). Z porovnání těchto dvou dokumentací jasně vyplývá, že nově provedená relikvidace několikanásobně zvýšila utěsnění a bezpečnou izolaci původně otevřených obzorů. Při relikvidaci byl celý vrt vyplněn cementovou směsí až po povrch a tímto způsobem bylo dosaženo maximálního možného utěsnění a izolace původně otevřených obzorů. Z tohoto pohledu by takto likvidované vrty neměly představovat riziko možného úniku uloženého CO₂ z ložiskových objektů za předpokladu dodržování původních ložiskových tlaků. Relikvidace některých dalších vrtů v zájmové lokalitě byly provedeny obdobným způsobem.

Na území české části ložiska Brodské bylo po r. 2010 relikvidováno celkem 23 vrtů, z toho 10 v jeho severní části. 6 z těchto 10 relikvidovaných vrtů zasahuje do ložiskové části obzorů badenu 12 a 13a potenciálního úložiště LBr-1; další 4 jsou situovány mimo ložiskové obzory (viz obr. 2-6). Na vrtech Br-62 a Br-64, na kterých byly v průběhu průzkumu a těžby zaznamenány havárie a na dalších 17 vrtech zasahujících hloubkově do rezervoárového souvrství úložiště LBr-1 relikvidace provedena nebyla. Těchto 19 vrtů je tedy potenciálně rizikových z hlediska možného úniku CO₂ z úložiště a musí být podrobena dalšímu zkoumání. Pro všechny likvidované a relikvidované vrty ložiska LBr-1 byla sestavena grafická schémata jejich vystrojení s anglickým popisem. Tato data byla dále využita pro analýzu rizik v Aktivitě 4. Všechna schémata byla začleněna do projektové geodatabáze tak, aby byla propojena s dalšími údaji o příslušných vrtech (stratigrafie, karotážní křivky, odebrané vzorky, apod.).

Obr. 2-2
Litostratigrafická
kolonka české části
Vidénské pánve
s vyznačením pozice
potenciálního úložné
struktury na
lokalitě LBr-1.

monitorovacího plánu úložiště (Aktivita 5) a posouzení střetů zájmů (Aktivita 6). V rámci charakteristiky lokality byly stručně zpracovány základní údaje o geografii, geomorfologii, klimatu, hydrologii, flóre a fauně, distribuci obyvatelstva, dopravě a způsobu využití území. Byl proveden pedologický průzkum a byla zpracována podrobná půdně typologická charakteristika území s vyhodnocením základních vlastností půd, způsobu jejich využití a půdně degradačních projevů (obr. 2-3). Byl vyhodnocen předpokládaný zábor zemědělského a lesního půdního fondu, dále bylo posouzeno, zda

Byla rovněž zkoumána možnost propojení hlubokých plyno- a roponosných obzorů (potenciální úložiště CO₂) s mělkou zónou do 210 m (což je hloubka starých vrtů na průzkum lignitu). Bylo zjištěno, že toto riziko nehrozí, protože těsnicí zlomy, které omezují ložisko v hloubce, nevycházejí k povrchu a jsou slepě ukončeny pod touto úrovní.

2.4 Geologická data

Rešerše dosavadních znalostí a existujících dat

Základním zdrojem geologických údajů jsou data z vrtů realizovaných v minulosti, archivní zprávy o geologickém průzkumu a výpočty zásob. V zachované dokumentaci, kdy klíčová souhrnná zpráva o ložisku pochází z roku 1960, je nutné předpokládat, že zjištěné poznatky a výsledky analýz budou odpovídat stavu poznání a technologií v době vzniku. V rámci projektu REPP-CO₂ bylo proto nutné se snažit získat co nejvíce nových údajů ze zachované hmotné dokumentace. Z celkových 103 vrtů na ložisku Brodské má 44 zachovanou primární dokumentaci ve formě různě rozsáhlé zprávy; tyto zprávy byly cenným zdrojem informací pro realizaci projektu. Základním kamenem pro získání mapových, analytických a dalších podkladů však byly zprávy o výpočtu zásob Šelleho et al. (1960), Hromce a Kolesíka (1964) a Káni (1993 a 1998).

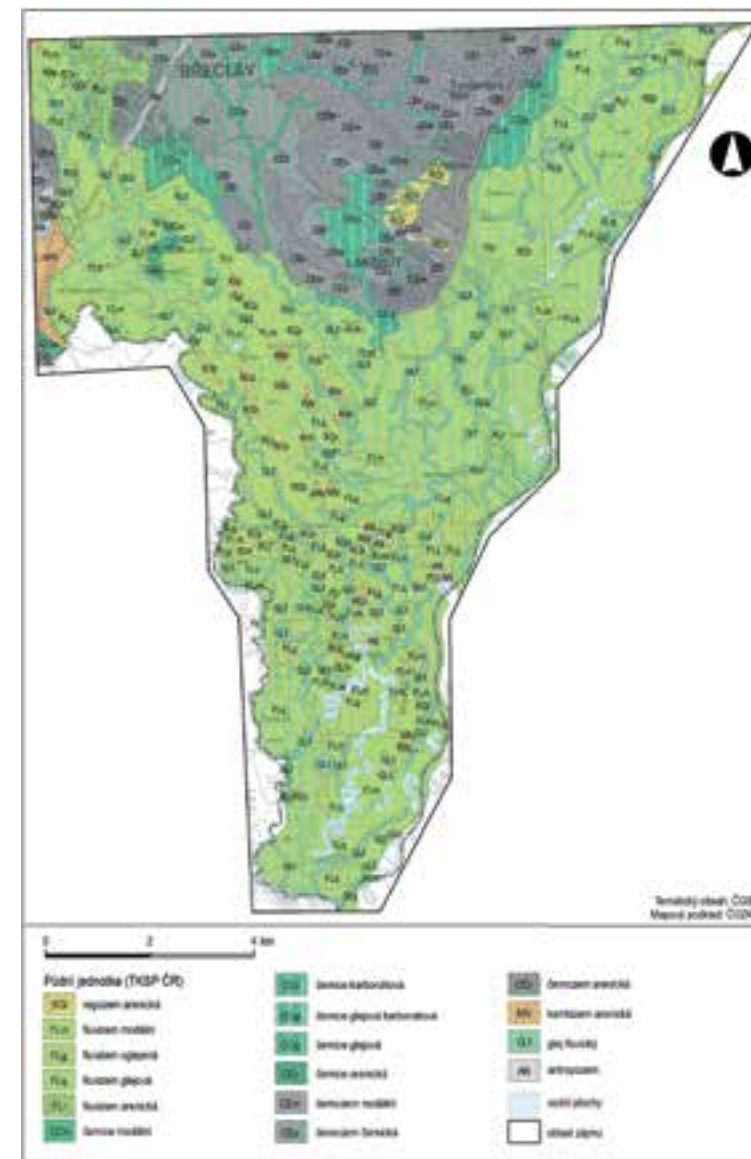
Další cenné informace o ložisku LBr-1 jsou v syntetizujících zprávách pro celou oblast Vidénské pánve, které obsahují strukturální mapy na různé stratigrafické úrovni. Vzhledem ke stáří zpráv a mapových podkladů se byly v rámci projektu tyto mapy převedeny do digitální formy (skenování a vektorizace).

Výstupem prací je mapový a databázový soubor všech zjištěných údajů z vrtů a archivních zpráv a plošná mapová schémata – 12 jednotlivých strukturálních map povrchu produktivních horizontů a map mocností produktivních horizontů. 4 strukturální mapy zahrnují celou plochu Vidénské pánve na území ČR a zbývajících 8 pokrývá dílčí část pánve v okolí ložiska Brodské, nebo jsou přímo v ložisku. Kromě strukturálních map bylo dále zvektorizováno 7 starších strukturálních řezů ložiskem. Tyto grafické podklady jsou součástí výstupu V1.5.

Geologické poměry ložiska Brodské

Rezervoárová struktura LBr-1, která je předmětem zkoumání projektu REPP-CO₂, představuje severní část ložiska Brodské (obr. 2-5). Zájmovým ložiskovým horizontem je tzv. lábský obzor – písčité sedimenty náležející střednímu badenu.

Sedimenty badenu mají v zájmovém území celkovou mocnost asi 700 m. Naspodu jsou bazální slepence, na které nasedají jíly spodního badenu v mocnosti do 350 m. Střední baden začíná sedimentací písků (včetně zájmového lábského obzoru), které jsou kolektorem pro ropu a plyn. Mají mocnost 50 až 80 m a je-



Obr. 2-3 Půdní mapa širšího okolí lokality.

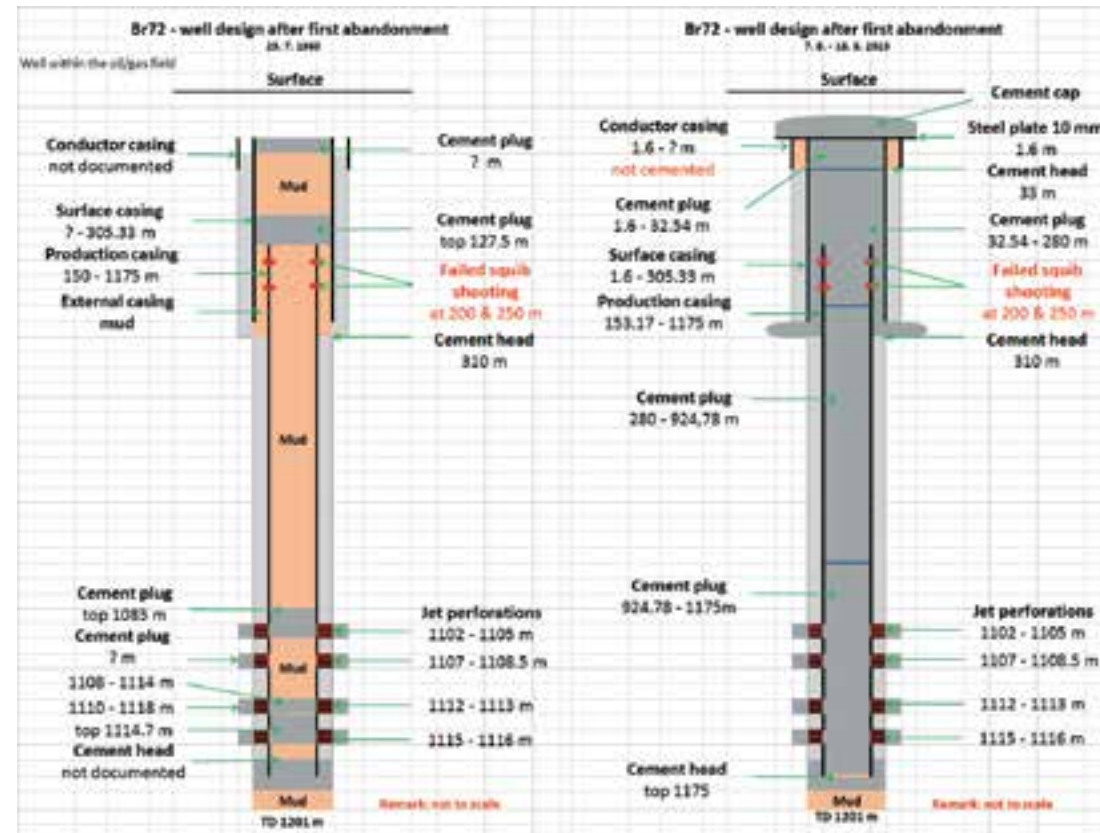
jich faciální vývoj se mění ve směru od jihu k severu. Nadložní pelity zóny aglutinovaných foraminifer (těsnicí vrstva zamýšleného úložiště CO₂) v mocnosti asi 100 m zmenšují svou mocnost směrem k severu. Také mocnost sedimentů svrchního badenu (asi 200 m) se směrem na sever redukuje (Dlabač 1971).

V podloží badenu byly prostoru v ložiska navrtány sedimenty karpátu v mocnosti až 600 m. Spodní miocén nebyl v tomto prostoru nikdy v celé mocnosti provrtán.

V nadloží badenu leží sedimenty sarmatu v úplném stratigrafickém vývoji, s pestrými jíly naspodu. Dosahují mocnosti cca 200 m. Sedimenty panonu jsou zachovány v celé mocnosti, s výjimkou tzv. vysoké kry (jv. část ložiska), kde jejich mocnost snížila denudace. Na předkvartérní povrch vychází postupně střední a směrem na východ potom spodní panon.

Pro vznik uzavřené struktury ložiska jsou podstatné zlomy (obr. 2-5). Farské zlomy ohraničují strukturu od

Obr. 2-4 Schéma vrtu Br-72 po původní likvidaci v r. 1960 (vlevo) a po relikvidaci v r. 2015 (vpravo).



> Obr. 2-5 Strukturální schéma ložiska Brodské podle Bílka (1974). Struktura LBr-1 (vyznačena barevně) představuje severní část ložiska. Vrstevnice zobrazují bázi lábského obzoru. Symboly \circ a \times označují polohu vrtů, přidružená čísla odpovídají číslům vrtů Br-xx. Řeka Morava představuje zároveň státní hranici mezi ČR a Slovenskem.

jihu. Na ně se kolmo napojuje brodský zlom, který směřuje k severu, má úklon na západ a výšku poklesu cca 120 m. V prostoru ložiska se od něho odštěpují malé zlomy, které se napojují na farské zlomy.

Detailní popis produktivní obzorů ropy a plynu v badenu a sarmatu podal Bílek (1974). Ve spodním badenu se navrtaly pouze malé čočkovité obzory průmyslově nevýznamné s mocností 1 až 3 m. Hlavní akumulace ropy a plynu se nacházejí ve středním badenu, kam namigrovaly z podložních matečných sedimentů. Migraci uhlovodíků vyvolaly pohyby spojené s pull-apart mechanismem prohlubování Vídeňské pánve. V období maximální subsidence v pánvi docházelo k vývoji zlomové sítě, k poklesům ker a ke změnám úklonu sedimentů.

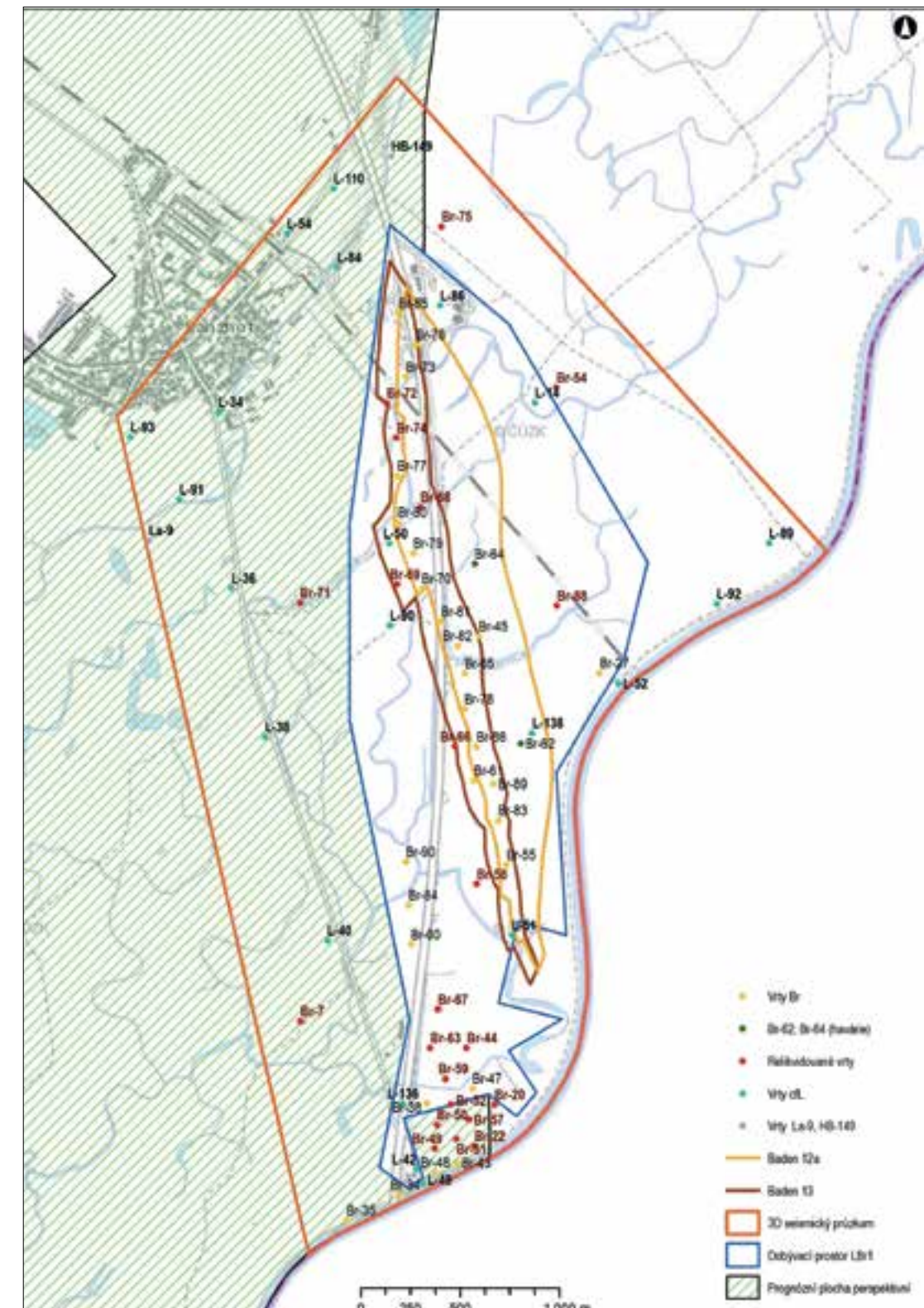
Po uložení pískových obzorů středního badenu a naplnění pastí uhlovodíky vznikl brodský zlom, který rozdělil jejich akumulace do dvou částí. Větší část (včetně struktury LBr-1) zůstala na pokleslé kře západně od zlomu a menší na vysoké kře v jv. části celého ložiska. Část lokálních akumulací se uzavřela v čočkových útvarcích ve středním a svrchním badenu. Akumulace plynu v nadložních sedimentech sarmatu vznikly mezivrstevní migrací do vysokých poloh při zlomech.

Hlavním roponosným obzorem ložiska Brodské jsou pískové horizonty středního badenu, které stratigraficky odpovídají lábskému obzoru. V jižní části ložiska tvoří komplex písků mocný až 80 m.



Mocnost lábského obzoru se směrem k severu zmenšuje a místy některé pískové polohy vyklíňují. V obzoru se tradičně vyčleňují 13. až 14. pískový horizont a lokálně ještě i horizonty 12, 12a a 13a (Bílek 1974). Jednotlivé horizonty jsou oddělené jíly, mocnými jen několik

metrů. Nejhlubší, 14. horizont má mocnost až 45 m. Pískový horizont 13 je mocný 10 až 15 m. Ostatní písky mají mocnost jen několik metrů. Hlavní ložiskově významné obzory středního badenu a vrtná prozkoumanost struktury LBr-1 (severní část ložiska Brodské) jsou na obr. 2-6.



Obr. 2-6 Hlavní ložiskově významné obzory středního badenu a vrtná prozkoumanost lokality LBr-1.

Ložisko Brodské se dělí na severní a jižní část podle litofaciálního vývoje pískových horizontů. V severní části, severně od vrtu Br-60 (kam náleží i struktura LBr-1), se mocnost celého komplexu písků zmenšuje tak, že jednotlivé písky místy splývají, místy vyклиňují a místy opět nasazují.

Z hlediska rozšíření v ložisku a velikosti zásob je nejdůležitější 13. pískový horizont. V severní části ložiska tvoří souvislý roponosný pruh s plynovou čepicí. V klasickém pojetí se v této části 13. horizont považuje za spojený se 14. pískovým horizontem (Bílek 1974). Mocnost písku kolísá; v roponosné části dosahuje nejvíce 8 m a v plynové části 7,5 m. Hranice okrajové podložní vody se pohybuje v rozmezí -948 až -953 m. Roponosné pásmo je široké cca 200 m a hranice ropa/plyn sleduje izohypsy -942 až -943 m. Produktivní plochu ohraničuje vyklinění na jihu i na severu. Produktivní plocha je cca 3 000 m dlouhá a s plynovou čepicí až 600 m široká. Vertikální pozitivní mocnost je zhruba 40 m.

Pískový horizont 12a je v severní části ložiska převážně plynový a má jen úzké roponosné pásmo. Horizont 12 tvoří v severní části pouze 5 izolovaných čoček obsahujících plyn.

Kolektorskou horninou ropy a plynu jsou jemnozrnné až střednozrnné písky s pórovitostí až 32 % a s dobrou propustností (ojediněle až 3700 mD). Vypočítané geologické zásoby v roce 1960 činily 670 000 t ropy a asi 200 · 10⁶ m³ plynu (Šelle et al. 1960, Bílek 1974). Z nich na severní část připadalo 300 000 t ropy a 100 · 10⁶ m³ plynu, na jižní část 120 000 tun ropy a 100 · 10⁶ m³ plynu a na vysokou kru 250 000 t ropy. Ropa se v severní části ložiska těžila režimem aktivní okrajové podložní vody a plynové čepice. Na jihu převládá režim okrajové vody a na vysoké kře režim rozpustného plynu. Skutečné vytěžené zásoby v dobývacím prostoru v dílčí části Brodské-sever činily během těžebního provozu k 31. 5. 1976 72 573 t ropy a 30 mil m³ plynu (Káňa 1998).

Ložisko je v současnosti vedeno jako vytěžené. Celková plocha původního dobývacího prostoru Brodské na českém území (v České republice po rozdělení Československa označeného jako Lanžhot I) činila 4,19 km².

Zhodnocení existujících vrtných jader a odběry vzorků pro analýzy

Vrtná jádra, využitelná pro odběry vzorků na nové analýzy, byla k dispozici ze 13 vrtů z ložiska Brodské. Jádra byla zachována většinou v malém množství a špatné kvalitě, když byly dochovány pouze jejich úlomky. Z několika vrtů byla sice zachována řada jader, prakticky však chyběly souvislé pevné kusy pískovců a vzorky z konkrétních produktivních obzorů. V případě vzorků pískovců (rezervoárové horniny) bylo proto nutné odebrat analogické vzorky z blízké lokality Hrušky, aby bylo možné provést různé typy potřebných analýz pro stanovení petrofyzikálních a geomechanických vlastností. Jádra byla nejdříve očištěna od prachu a dalších nečistot, poté

byla detailně popsána sedimentologem a podrobena fotografické dokumentaci. Potom byl stanoven postup odběru vzorků; určitá část vzorků byla vyměněna mezi jednotlivými pracovišti, aby mohly být na stejných vzorcích horniny provedeny různé typy analýz.

Primární dokumentace vrtních jader byla provedena z těchto vrtů s dosud zachovanou hmotnou dokumentací:

- Br-35 (15 zachovaných vzorkovnic po 1 m)
- Br-45 (13 vzorkovnic)
- Br-46 (10 vzorkovnic)
- Br-52 (4 vzorkovnice)
- Br-54 (7 vzorkovnic)
- Br-55 (2 vzorkovnice)
- Br-60 (5 vzorkovnic)
- Br-63 (2 vzorkovnice)
- Br-64 (2 vzorkovnice)
- Br-65 (4 vzorkovnice)
- Br-70 (3 vzorkovnice)
- Br-71 (7 vzorkovnic)
- Br-75 (4 vzorkovnice).

Veškerá dokumentace byla průběžně ukládána do projektové geodatabáze.

Z dochovaných vrtných jader z vrtů Brodské a Hrušky byly odebrány vzorky na mikropaleontologii (55 vzorků), k petrografickému zhodnocení sedimentů (42 výbrusů) a k stanovení mineralogického složení metodou RTG difrakce (28 vzorků). Další vzorky byly odebrány pro účely petrofyzikálních, geochemických a geomechanických analýz a experimentů (viz níže).

Litofaciální analýza a sekvenční stratigrafie

Litofaciální analýza byla založena na zhodnocení makroskopicky zjištěných strukturních a texturních znaků na vrtných jádrech, podpořeném daty z mikropaleontologických a petrografických analýz. Bylo vyčleněno celkem 15 litofacií, které lze na základě velikosti klastických částic začlenit do pěti skupin (jílovcová, prachovcová, heterolitická, pískovcová a slepencová skupina litofacií). Byl zkoumán výskyt jednotlivých litofacií v rámci stratigrafických jednotek zjištěných v oblasti ložiska Brodské (karpat, spodní baden, střední baden, svrchní baden, sarmat). V rámci sedimentární výplně každého regionálního stupně či jeho části byly pak dle možnosti vyčleňovány i faciální asociace, které byly následně využity pro interpretaci depozičního prostředí.

Sekvenčně stratigrafická analýza vycházela především ze zhodnocení karotážních diagramů, které byly k dispozici. Byly sledovány především hodnoty i charakteru/tvary křivek spontánní polarizace (SP) a odporové karotáže (RAG2), které mají tradičně určitou výpovědní hodnotu pro sedimentárně-geologické interpretace. Charakter průběhu karotážních křivek byl srovnán s odebranými vrtnými jádry, a to především s ohledem na interpretaci depozičního prostředí a jeho vývoj.

Výše uvedené analýzy byly provedeny pro celou stratigrafickou sekvenci karpat-baden-sarmat; z hlediska plánovaného úložiště CO₂ jsou však nejvýznamnější výsledky pro střední baden.

Sedimenty středního badenu byly dostupné v 19 jádrech v celkem osmi vrtech. Litofaciálně byly relativně velmi pestré, bylo zjištěno 12 litofacií, které byly seskupeny do několika faciálních asociací a interpretovány především jako sedimenty deltové či výplavové plošiny protkané distribučními kanály, sedimenty březní zóny (příbřeží a svrchního předbřeží) a sedimenty mělkomořské.

Z pohledu sekvenční stratigrafie byly v těchto sedimentech vyčleněny tři systémové trakty – FSST (trakt klesající hladiny), TST (transgresivní trakt) a HST (trakt vysoké hladiny), které tvoří jednu depoziční sekvenci 3. řádu. Tato interpretace byla poté porovnána s regionálními stratigrafickými jednotkami, tj. pestrým žižkovským souvrstvím, lábským obzorem a tzv. zónou aglutinancí. Pokud jde o lábský obzor – hlavní zájmový horizont projektu – zjištěné litofacie ukazují nejspíše na sedimentaci v rámci přechodného prostředí, tj. deltové či výplavové plošiny protkané distribučními kanály.

Z odebraných vzorků prachovců až velmi jemnozrnných pískovců, jemnozrnných pískovců a drobnozrnného vápnatého slepenec byly vyhotoveny výbrusy k petrografickému studiu. Kromě slepenec, který je zrnitostně špatně vyříděný, jsou horniny zrnitostně dobře vyříděné, se středním opracováním klastické složky (poloostrohranné až polozaoblené klasty převažují). Z klastických úlomků dominuje křemen (průměrně okolo 10–15 mod. %, u slepenec až okolo 25 mod. %), většinou převažují monokrystalická zrna křemene nad polykrystalickými zrny; živec jsou zastoupeny (draselný živec, plagioklas) okolo 1–2 mod. %, některé jsou částečně sericitizovány. Proměnlivé je zastoupení slíd (muskovit výrazně převažuje nad biotitem a chloritem) – od ojedinělých výskytů (slepenec) až po 3 mod. %. Glaukonit se vyskytuje jen vzácně. Poměrně výrazná je přítomnost klastů karbonátů a mikritizovaných úlomků, v hornině se objevují okolo 5–6 mod. %, místy až 10 mod. %. Z horninových úlomků se u slepenec poměrně hojně vyskytují zlomky kyselých vulkanitů, dále pak vulkanická skla, granitoidy, kvarcity a glaukonitické pískovce. Z bioklastických úlomků (až okolo 1 mod. % v hornině) byly zjištěny mikritizované schránky měkkýšů a schránky foraminifer. Hojná je i příměs organické (rostlinné) drtě. Pojivo má pórový i bazální charakter, je převážně tvořeno karbonátovým tmelem s příměsí jílových minerálů, karbonát koroduje okolní klastická zrna (korozivní charakter karbonátového tmelu).

Z hlediska mikropaleontologického se v sedimentech středního badenu se hojněji vyskytují aglutinované druhy foraminifer dokumentující tzv. zónu aglutinancí sensu Grilla (1941), zastoupené např. druhy *Semivulvulina pectinata* (Rss.), *S. deperdita* (Orb.), *Quinqueloculina akneriana* (Orb.), *Textularia gramen* (Orb.), *T. pala* (Czjzk.),

Ammodiscus sp., *Spirorutilus carinatus* (Orb.), *Spiroloculina canaliculata* (Orb.); hojněji se vyskytují také euryoxybiontní taxony představované rody *Praeglobobulimina* div. sp., *Bulimina* div. sp. a *Bolivina* div. sp. V některých společenstvech dominuje k obsahu kyslíku i soli tolerantní *Ammonia viennensis* (Orb.).

Mineralogické složení horninových vzorků (RTG difrakční analýza)

V odebraných vzorcích ze sedimentů z vrtů Brodské i Hrušky je podle výsledků RTG difrakční analýzy jednoznačně dominantním minerálem křemen. Sedimenty z vrtů Brodské jsou tvořeny následujícími minerály: křemen (29,88–60,69 %), muskovit (8,54–35,78 %), kalcit (6,97–14,03 %), montmorillonit (6,71–12,89 %), albit (6,62–9,09 %), chlorit (4,04–8,23 %), dolomit (1,70–9,21 %), Kživec – ortoklas, mikroklin (1,49–5,18 %), sádrovec (0,52–1,92 %). Dále pak byl v některých vzorcích zaznamenán pyrit, siderit, kaolinit a ankerit. Analyzované sedimenty z vrtů Hrušky jsou tvořeny následujícími minerály (uvedeny v pořadí podle klesajícího obsahu): křemen (33,93–77,98 %), muskovit (4,29–19,16 %), kalcit (32,18–3,44 %), albit (4,36–16,13 %), dolomit (2,28–15,87 %), chlorit (1,31–13,93 %), K-živec (0,64–5,98 %), sádrovec (0,72–2,41 %), kaolinit (0,31–9,07 %) a ankerit (ten pouze v některých vzorcích). Každý z uvedených minerálů je v prostředí působících roztoků různě stabilní. Příklad RTG difrakční analýzy vzorku z vrtu Br-45 je na obr. 2-7.

2.5 Geofyzikální data

Seismická data

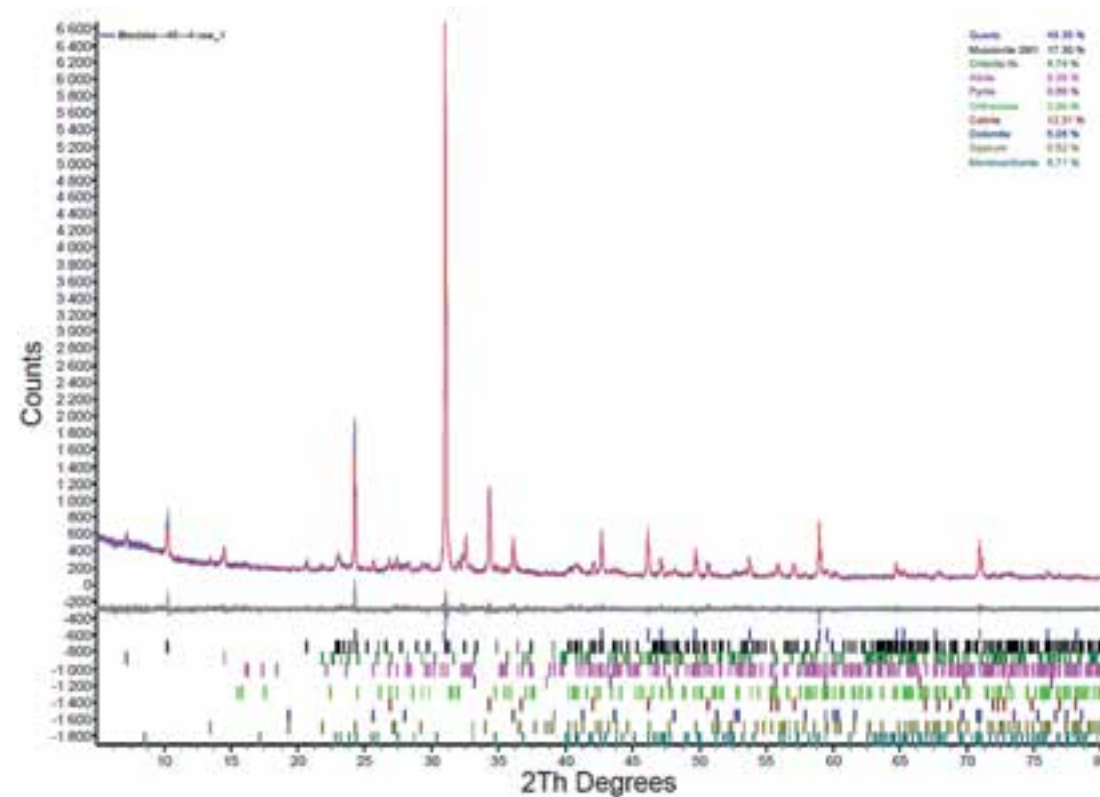
Seismická data představují jeden hlavních informačních a datových vstupů pro tvorbu geologického modelu v Aktivitě 2. Z geofyzikální databáze ČGS byly vybrány časové i hloubkové řezy podél seismických reflexních profilů v širším zájmovém území lokality LBr-1 a byla posouzena, popř. upravena jejich původní geologická interpretace. Data a interpretace byly připraveny pro import do trojrozměrného geologického modelu (Aktivita 2). Česká geologická služba má pro širší zájmové území lokality LBr-1 k dispozici údaje celkem o 39 archivovaných seismických profilech, pořízených ze státního rozpočtu v letech 1971 – 1994.

Na základě dohody s původním operátorem ložiska (MND, a.s.) byla pro potřeby projektu rovněž poskytnuta data trojrozměrné (3D) seismiky. Datový blok pokrývá celé zájmové území lokality; to umožní detailně interpretovat zlomový a strukturní plán úložiště a celého úložného komplexu. Hlavní interpretační práce proběhly přímo v modelovacím prostředí pro tvorbu 3D modelu v rámci Aktivita 2 a jsou popsány v kap. 3.

Karotážní data

Z lokality LBr-1 byly na základě dohody s MND, a. s., předány k využití v projektu papírové karotážní záznamy

Obr. 2-7 Výsledky RTG difrakční analýzy – fázové spektrum vzorku Br-45 s interpretací.



z celkem z celkem 42 vrtů. Všechny tyto záznamy (jedná se vesměs o křivky odporové karotáže a spontánní polarizace) již byly digitalizovány (formát LAS) a jejich digitální verze byly rovněž k dispozici pro potřeby projektu (celkem 50 digitálních karotážních záznamů). Dalším zdrojem dat byla karotážní měření (GK, NGK) prováděná při relikvidace vybraných vrtů na lokalitě LBr-1 firmou PKÚ. Karotážní měření je zde prováděno za účelem ověření výskytu dalších (původně nepodchycených) horizontů nasycených vrstevními tekutinami. Celkem bylo od PKÚ k využití v projektu získáno 12 karotážních záznamů z relikvidovaných vrtů.

Karotážní křivky byly shromážděny do uceleného souboru, který byl jednak předán k využití pro litofaciální a seismologickou analýzu (viz kap. 2.4), jednak připraven k přímému importu do modelovacího prostředí 3D modelu (Aktivita 2), kde byl použit pro další interpretaci. V jejím rámci byly provedeny výpočty hodnot porozity a jílovitosti, které byly dále využity pro budování 3D geologického modelu v Aktivitě 2. Výpočty byly provedeny celkem na 50 vrtech se zaměřením na produktivní ložiskové obzory a jejich těsnící nadloží.

Gravimetrická a magnetometrická data

Pro širší zájmové území lokality LBr-1 byla z databáze ČGS vybrána digitální data úplných Bouguerových anomálií a hodnot ΔT (popř. ΔZ), z nichž byly vytvořeny primární mapy izoliní. Tyto mapy byly korelovány s geologickými mapami 1 : 50 000, údaji o charakteru horninového prostředí na bázi sedimentů z hlubokých vrtů a mocnostmi

sedimentárních hornin. Byl určen pravděpodobný zdroj gravimetrických a magnetických anomálií. Jako výstup vznikly mapy širšího zájmového území lokality LBr-1 s korelacemi tíhových, magnetických a geologických dat a pravděpodobných zdrojů anomálií. Tyto výstupy byly využity při konstrukci 3D geologického modelu širšího úložného komplexu v Aktivitě 2.

Zhodnocení archivních gravimetrických a magnetometrických data a jejich geologické interpretace publikované v archivních zprávách a článkách přineslo tyto poznatky:

- Gravimetrická a magnetometrická měření byla využívána především pro regionální průzkumy geologické stavby, tj. odhad hloubky a charakteru podloží.
- Gravimetrická data byla používána současně se seismickými daty především k interpretaci zaměřené na vyhledávání plyno- a roponosných struktur, tj. určení průběhu zlomů a hloubky podloží jednotlivých tektonických bloků.
- Archivní gravimetrická měření nepokrývají studovanou oblast v hustotě potřebné k podrobnější interpretaci dat v měřítku 1 : 25 000 nebo větším; především podél hranice s Rakouskem je malá hustota měřených bodů.

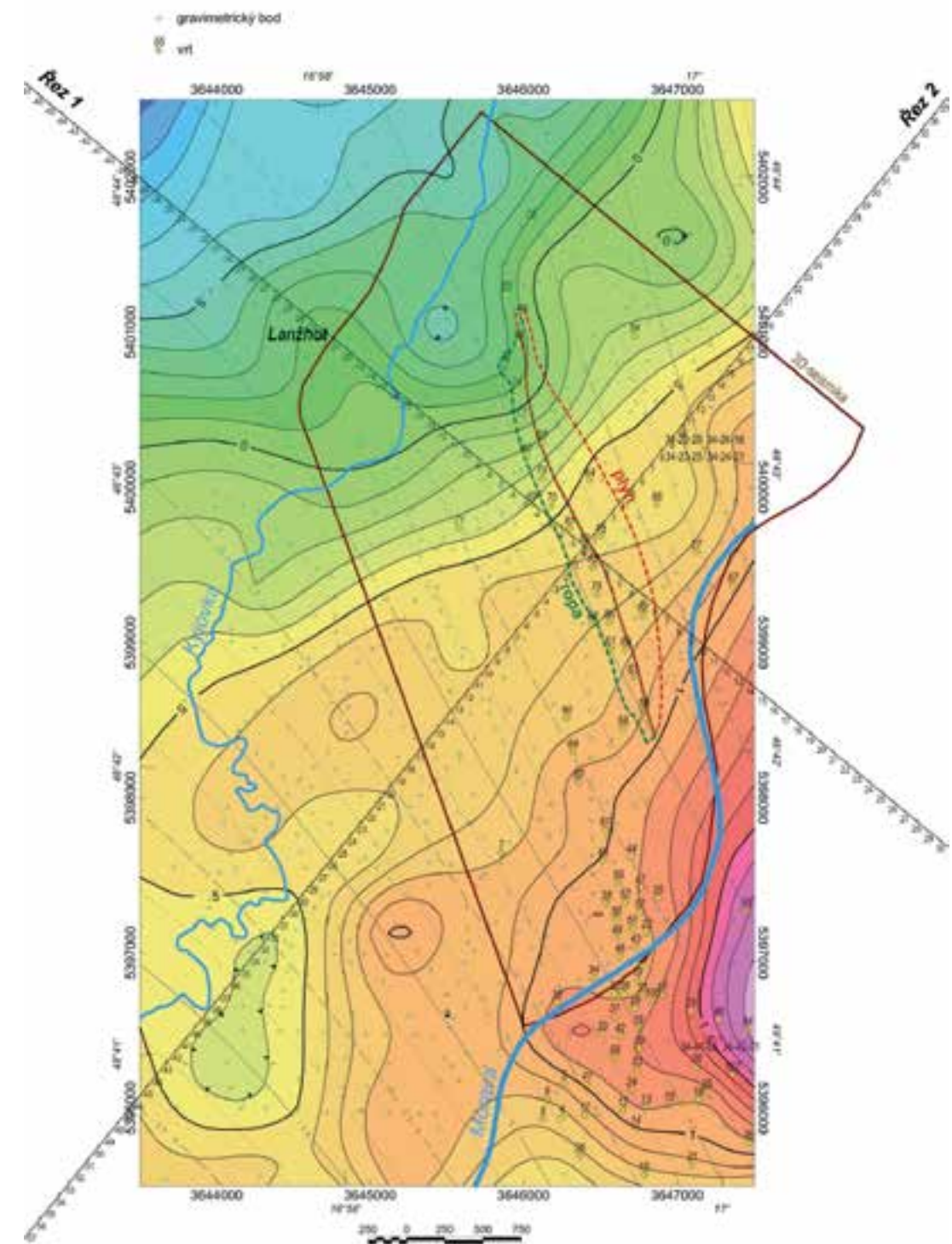
Gravimetrické a magnetometrické mapy byly převedeny do geodatabáze projektu ve formátu *.tif.

Nové gravimetrické měření na lokalitě LBr-1

Gravimetrické měření na lokalitě LBr-1 uskutečnil Miligal během srpna 2015. Navázalo na starší gravimetrická mě-

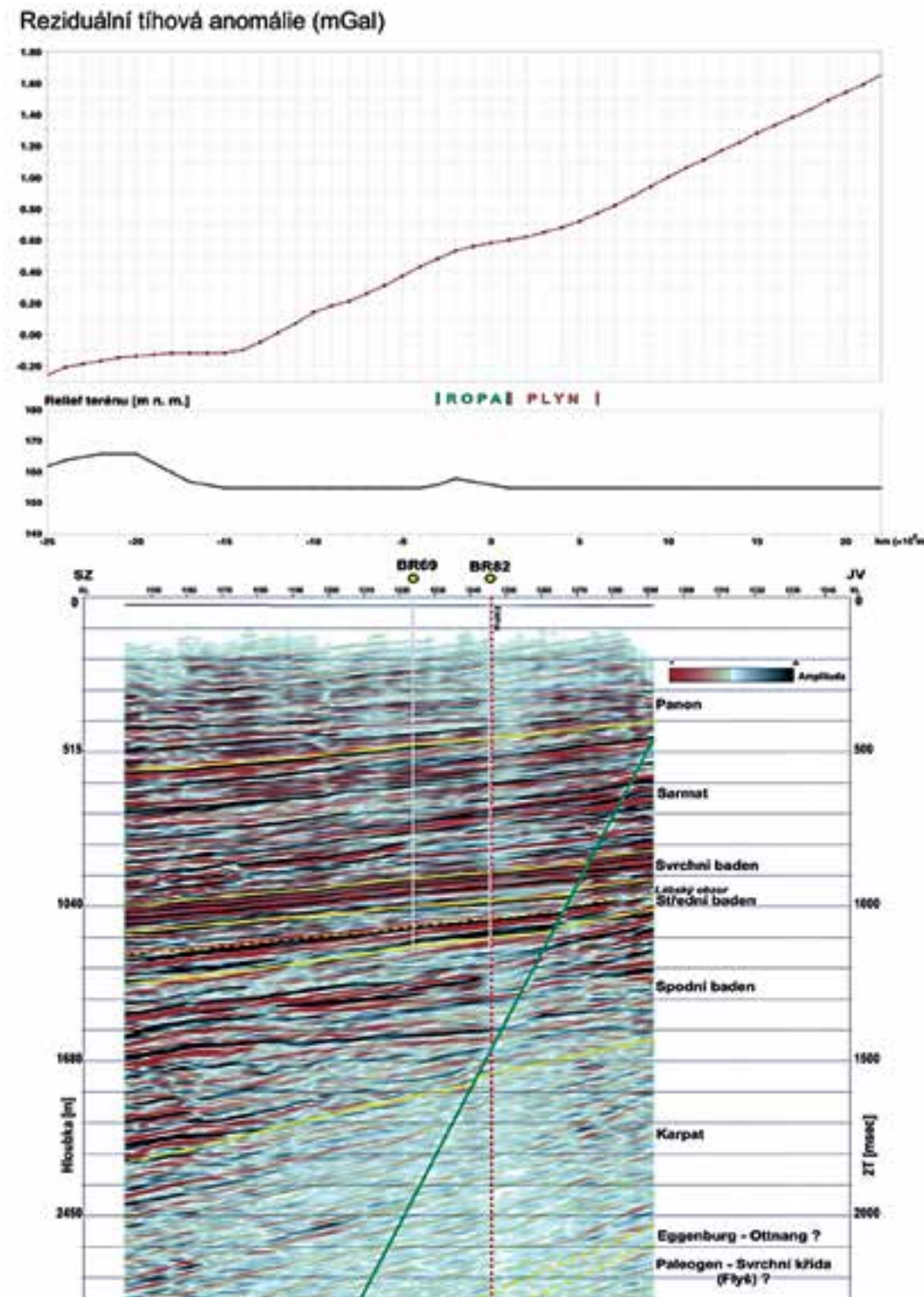
ření z minulého století (Blížkovský 1961, Odstrčil 1964). Na ploše 20 km² bylo změřeno celkem 600 nových gravimetrických bodů. Měření bylo provedeno novým digitálním gravimetrem Scintrex AutoGrav CG-5, který byl pořízen z prostředků projektu. Gravimetrické body byly přednostně situovány podél místních komunikací nebo lesních cest, průměrná vzdálenost mezi body byla 200 m.

Souřadnice gravimetrických bodů byly zaměřeny pomocí GPS, výšky gravimetrických stanovišť byly změřeny geometrickou nivelací. Výškové měření bylo napojeno na Českou jednotnou nivelační síť (ČJNS). Gravimetrické měření bylo navázáno na body základního bodového pole České gravimetrické sítě S-Gr95. Přesnost gravimetrického měření byla vypočtena z kontrolního měření na 44 bodech a činí 0,02 mGal.



Obr. 2-8 Mapa reziduálních tíhových anomálií sestavená na základě výsledků nového gravimetrického měření (šedé linie na pozadí zobrazují regionální trend) s vyznačením pozice interpretačních řezů.

Obr. 2-9 Detailní
tíhový a seismický
řez 1 (SZ-JV).



Z naměřeného tíhového zrychlení na 600 nových bodech a na 123 starších gravimetrických bodech byly vypočteny úplné Bouguerovy anomálie. V rámci numerického zpracování měřených dat musely být vyloučeny rušivé účinky slapů, rotace i tvarového zploštění zemského tělesa a dále vlivy z rozdílné výšky a morfologie toporeliéfu v okolí gravimetrických bodů. Hod-

noty vypočtených anomálií byly poté interpolovány do pravidelné čtvercové sítě o straně 125 m. Odseparováním regionálního tíhového trendu z hlubších partií Země byly z Bouguerových anomálií vypočteny reziduální tíhové anomálie, které indikují hustotní změny v geologické stavbě připovrchových partií zemské kůry.

Mapa reziduálních anomálií (obr. 2-8) byla sestrojena pro redukční hustotu $2,00 \text{ g.cm}^{-3}$ odpovídající hustotě hornin zemského povrchu v oblasti struktury LBr-1. Mapa byla vytvořena pomocí software Geosoft Oasis Montaj s interpolačním intervalem $0,1 \text{ mGal}$ ($1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$). Hodnoty reziduálních anomálií se v celém zájmovém území pohybují v rozmezí od -1 mGal (na SZ území) po téměř $+2 \text{ mGal}$ (na JV). Výrazná dílčí kladná reziduální anomálie v jz. rohu mapy je vázána na tzv. vysokou kru podloží – tj. na oblast, která se nachází na východ od brodského zlomu. V území nad ložiskovou strukturou LBr-1 nabývají reziduální gravimetrické anomálie hodnot od $-0,1 \text{ mGal}$ (na SZ) do $+1 \text{ mGal}$ na JV.

Interpretace naměřených anomálií byla provedena jak v ploše, tak i na interpretačních řezech 1 a 2 protínajících strukturu LBr-1 (jejich poloha je vyznačena na obr. 2-8). Na obr. 2-9 je zobrazen průběh reziduálních gravimetrických anomálií na příčném řezu č. 1. Zobrazené gravimetrické anomálie jsou doplněny interpretovanými časovými řezy z 3D seismického průzkumu, v nichž je na vertikální ose vedle časů příchodu odražených vln vynesena také přibližná hloubková úroveň reflexních horizontů. V souladu s mapou reziduálních anomálií na obr. 2-8 není v řezech patrná korelace lokálních záporných anomálií s rozsahem ložiskové struktury LBr-1.

Anomálie jsou spíše vyvolány nehomogenitami v horninové výplni Vídeňské pánve, a tento vliv zůstane s vysokou pravděpodobností dominantní i po vybudování úložiště CO_2 . Vzhledem k dimenzím struktury LBr-1 lze předpokládat, že tíhový účinek vtlačeného CO_2 bude jen marginální, což za daných okolností víceméně vylučuje možnost, že by běžným gravimetrickým měřením bylo možno mapovat rozsah oblaku CO_2 uloženého v úložišti.

Tato možnost byla zvažována na základě údajů z literatury, které ukazují, že nad úložišti CO_2 lze v některých případech indikovat malé záporné gravimetrické anomálie. To je dáno skutečností, že hustota CO_2 je menší než hustota okolních fluid. Příkladem může být úložiště CO_2 Sleipner v Norsku, v pískovcích Utsira Formation cca 1000 m pod hladinou Severního moře, kde v období 2002–2009 bylo do podzemí zatlačeno 5,88 milionu tun CO_2 . Gravimetrickým měřením na 40 stanovištích vzdálených 500 m zde byla zjištěna záporná anomálie $-0,012 \text{ mGal}$ a byla vypočtena průměrná hustota uloženého CO_2 na $0,720 \text{ kg.m}^{-3}$ (Alnes et al. 2011). Pro LBr-1 však vzhledem k lokálním podmínkám a předpokládaným malým objemům uloženého CO_2 není tato možnost reálná.

Výsledky gravimetrického měření a jeho interpretace jsou podrobně popsány ve výstupech V1.14 a V1.15.

2.6. Rezervoárové parametry a parametry těsnících hornin

Rešerše archivních dat

V první fázi tohoto úkolu byla provedena rešerše archivních dat se zaměřením zejména na údaje o porozitě

a permeabilitě. Přímo z ložiska LBr-1 nebyly zjištěny žádné archivní údaje o hustotě, permeabilitě nebo porozitě hornin ze speciálních měření. Rešerše byla proto provedena z vrtů v okolí (Břeclav-25, 26, 30; Hrušky-240, Lanžhot-5, 6, 7 a Týnec-137). Po zpracování byla data předána k dalšímu využití, zejména v rámci stavby 3D modelu v Aktivitě 2, popř. v dalších úkolech Aktivita 1.

Nová měření petrofyzikálních vlastností

K novým laboratorním testům posloužila vrtná jádra, která byla v minulosti získána v rámci průzkumů a těžební otvírky (viz kap. 2.4). Zachovaná jádra přímo z lokality LBr-1 bohužel byla ve špatném stavu a prakticky se nezachovaly zbytky hornin přímo z ložiskových obzorů. Proto musely být odebrány další vzorky vrtných jader z analogické lokality Hrušky.

Vybrané vzorky jader vhodné k laboratornímu stanovování petrofyzikálních vlastností byly převezeny do Laboratoře stimulace vrtů a ložisek uhlovodíků VŠB, kde byly upraveny do podoby vhodné k analýzám.

Měření proběhla na 4 vzorcích z ložiska LBr-1, doplněných o 9 vzorků z ložiska Hrušky, u kterých se podařilo odvrtat vhodná jádra pro petrofyzikální měření. Na ostatních vzorcích z ložiska LBr-1 se buď nepodařilo odvrtat vhodná jádra, nebo konzistence vzorků nebyla vhodná pro jakoukoliv mechanickou manipulaci. To samé se týká i některých dostupných vrtných jader z ložiska Hrušky.

Měření proběhla na vzorcích z vrtů Br-45, Br-35, Br-52 a Br-60 (ložisko LBr-1), a dále Hr-155 (2 jádra), Hr-43 (2 jádra), Hr-150, Hr-5 a Hr-52 (ložisko Hrušky). U těchto vzorků bylo odvrtáno jádro o průměru $1,5''$ ($3,81 \text{ cm}$) a maximální délce, kterou vzorky dovolily. Měření proběhlo na aparatuře COREVAL 700 (Automatický porozimetr/permeometr). Boční tlak P_c (confining pressure) byl zvolen v kroku 600, 1000, 1450 a 600 psi. Maximální zvolený tlak 1450 psi odpovídá cca 10 MPa, 600 psi odpovídá tlaku 4,1 MPa a 1000 psi odpovídá 6,9 MPa. Teplota měření odpovídala teplotě laboratoře, tedy 20°C .

Měřené jádro bylo vloženo do manžety a stlačeno na příslušný boční tlak. Následně byly stanoveny měřené veličiny. Pro boční stlačení se využívá stlačeného vzduchu, pro stanovování petrofyzikálních parametrů se používá dusík. Byly měřeny tyto veličiny:

- objem pórového prostranství V_p (cm^3),
- propustnost pro plyn K_{air} (mD),
- propustnost pro kapalinu („Klinkenberg“) K_{∞} (mD),
- pórovitost ϕ (%),
- objem vzorku V_b (cm^3),
- objem rostlé části V_g (cm^3),
- měrná hmotnost rostlé části ρ_g (g/cm^3),
- měrná hmotnost vzorku ρ_b (g/cm^3),
- slip faktor (psi).

Plánované pokusné měření fázových propustností nebylo možné realizovat v předpokládaném rozsahu. Z obou zkoumaných lokalit (LBr-1, Hrušky) nebyl k dispozici žádný horninový vzorek z kolektorských vrstev nasy-

cených původně ropou; v žádném z odebraných vzorků z obou lokalit nebyla organolepticky přítomnost ropy stanovena. Výzkum byl proto proveden pouze na jednom propustném jádru ze sondy Br-45; jako srovnávací etalon byly použity vzorky hoříckého pískovce.

Měření za přítomnosti dvou fází (ložisková voda/ropa) bylo realizováno pomocí fázových permeometrů BRP-350 a FDS-350 (Vinci, Francie) na jediném vhodném vzorku z ložiska LBr1, jehož parametry nasvědčovaly jeho použitelnosti v experimentu vytěšňování vody ropou a naopak. Použitý vzorek jádra byl z vrtu Br-45, z hloubkového intervalu 1300 – 1307 m. Tento vzorek byl saturován syntetickou ložiskovou vodou, svým chemismem odpovídající průměrným hodnotám chemických analýz vrstevní vody ložiska LBr-1 (dále označována jako voda), a vystaven po dobu dvou týdnů simulovanému tlaku nadloží o hodnotě 3267 psi, pórovému tlaku vyvozeném syntetickou ložiskovou vodou o hodnotě 725,5 psi a teplotě 43 °C. Za těchto podmínek pak byl stanoven absolutní koeficient propustnosti K_{abs} v tomto případě o hodnotě 516,85 mD. Poté bylo přistoupeno k vytěšňování vody mrtvou ropou (bez rozpuštěných ložiskových plynů) z ložiska Hrušky (dále označována jako ropa) o objemovém průtoku 0,5 ml/min za stejných p-T podmínek. Takto byla stanovena neredukovatelná saturace vodou (S_{wi}) a efektivní ($K_{o(S_{wi})}$), resp. relativní ($K_{ro(S_{wi})}$) koeficient propustnosti pro ropu za daných podmínek. Poté byl vzorek ponechán dva týdny vystaven ropě (za stejných p-T podmínek), načež bylo přistoupeno k procesu vytěšňování ropy vodou. Takto byla stanovena zbytková saturace ropou (S_{or}) a efektivní ($K_{w(S_{or})}$), resp. relativní ($K_{rw(S_{or})}$) koeficient propustnosti pro vodu za daných podmínek. Produkce ropy ze vzorku během zavodňování činila 35,84 %.

Pro stanovení dalších důležitých charakteristik rezervoárových hornin byly na pracovišti VŠB provedeny analýzy vzorků pomocí zařízení zvaného retortová pec, které je schopno určit kvantitativně zbytkové nasycení kapalinami. Tato pec pracuje s nadrceným horninovým vzorkem, který postupně zahřívá až na teplotu 650 °C. Odpařené kapaliny z ocelových zásobníků procházejí chladicí lázní, kde kondenzují a jsou zachytávány do kalibrovaných byret o objemu 20 ml. K měření byly jako vhodné vybrány 4 vzorky z ložiska Hrušky, které splňovaly požadované kritérium hmotnosti v drčeném stavu alespoň 120 g. Jednalo se o vzorky z vrtů: Hr-150 (hloubka 1363–1368 m; 2 vzorky), Hr-43 (1803–1808 m) a Hr-155 (1395–1400 m).

K vyhodnocení nasycenosti (S_w) vybraných vzorků je nutné znát další vstupní data: ρ_b (objemová hmotnost vzorku), V_z (objem celého vzorku), ϕ_0 (porozita vzorku) a V_{p0} (objem pórů vzorku). Hodnota ϕ_0 byla přebrána z dřívějších měření na zařízení COREVAL 700, zbylé vstupní hodnoty nutné pro výpočet byly stanoveny laboratorně.

Výsledky nových měření jsou podrobně popsány ve výstupu V1.16.

Vlastnosti rezervoárových fluid

Data o vrstevních tekutinách představují základní vstupní informace pro tvorbu statického geologického modelu v Aktivitě 2 a vstupní informace pro stanovení chemismu interakcí CO₂ s horninovým prostředím (viz kap. 2.8) a posouzení rizik spojených s ukládáním (Aktivita 4). Byla provedena rešerše dostupných údajů z dřívějších ložiskových hydrogeologických měření, zpráv a publikací.

Z archivních údajů základní geologické dokumentace – složek jednotlivých vrtů a výpočtů zásob – byly vybrány údaje o syčení kolektorských hornin vodou a ropou spolu s obsahem karbonátů a litologickou charakteristikou intervalu. Takové údaje byly získány pouze z vrtů Br-61, 65, 68, 70, 74, 79, 82 a 86. Údaje o analýzách vod byly získány z celkem 50 vrtů; analýzy plynů pouze z vrtů Br-45, 64, 65, 73, 76 a 86.

Vzorky ropy z ložiska LBr-1 nebyly dostupné, zkoumána byla proto ropa z analogické lokality Hrušky, z vrtu Hr-233. Analýzy byly provedeny na pracovištích IRIS a ČGS. Z archivu a databázi ČGS byly kromě toho získány starší analýzy fluid v oblasti LBr-1 a okolí:

- archivní analýza rop z LBr-1;
- chemické složení plynů z ložisek ropy a plynu ve Vídeňské pánvi;
- izotopické složení uhlíku z metanu $\delta^{13}C$ (C1), etanu $\delta^{13}C$ (C2), propanu $\delta^{13}C$ (C3) a CO₂ $\delta^{13}C$ (CO₂) z ložisek ve Vídeňské pánvi.

Veškerá získaná data byla předána pro uložení do geodatabáze a poskytnuta k dalšímu využití v návazných úkolech a Aktivitách.

Tlakové a teplotní parametry, historie těžby

Ve spolupráci s původním operátorem ložiska zajistili pracovníci ČGS rešerši dostupných údajů o vývoji p-T podmínek v zájmovém rezervoáru a o historii těžby ropy. Tato data jsou důležitým vstupním údajem pro dynamické modelování v Aktivitě 3.

Údaje o ložiskovém tlaku z archivních zdrojů se podařilo získat pouze z vrtů Br-45, 55, 65, 73 a 76. Teplotní měření byla pouze ve vrtech Br-8 a 61. Údaje o kubaturách těžby za konkrétní časový úsek byly získány celkem z 26 vrtů; z vrtu Br-64 byla získána nejpodrobnější data, protože se u něj musela zvládnout nečekaně vysoká erupce plynu. Byl sestaven tabulkový přehled celkových těžeb ropy z jednotlivých produktivních obzorů.

2.7 Hydrogeologické parametry

Rešerše dosavadních znalostí a existujících dat pro mělký oběh podzemních vod

Bylo provedeno zhodnocení archivních hydrogeologických zpráv a dalších výstupů a údajů z vrtné databáze týkajících se mělkého oběhu podzemních vod v zájmové oblasti. Hlavním zvodněným kolektorem je spodní část souvrství údolní nivy složená ze štěrků, štěrků s pří-

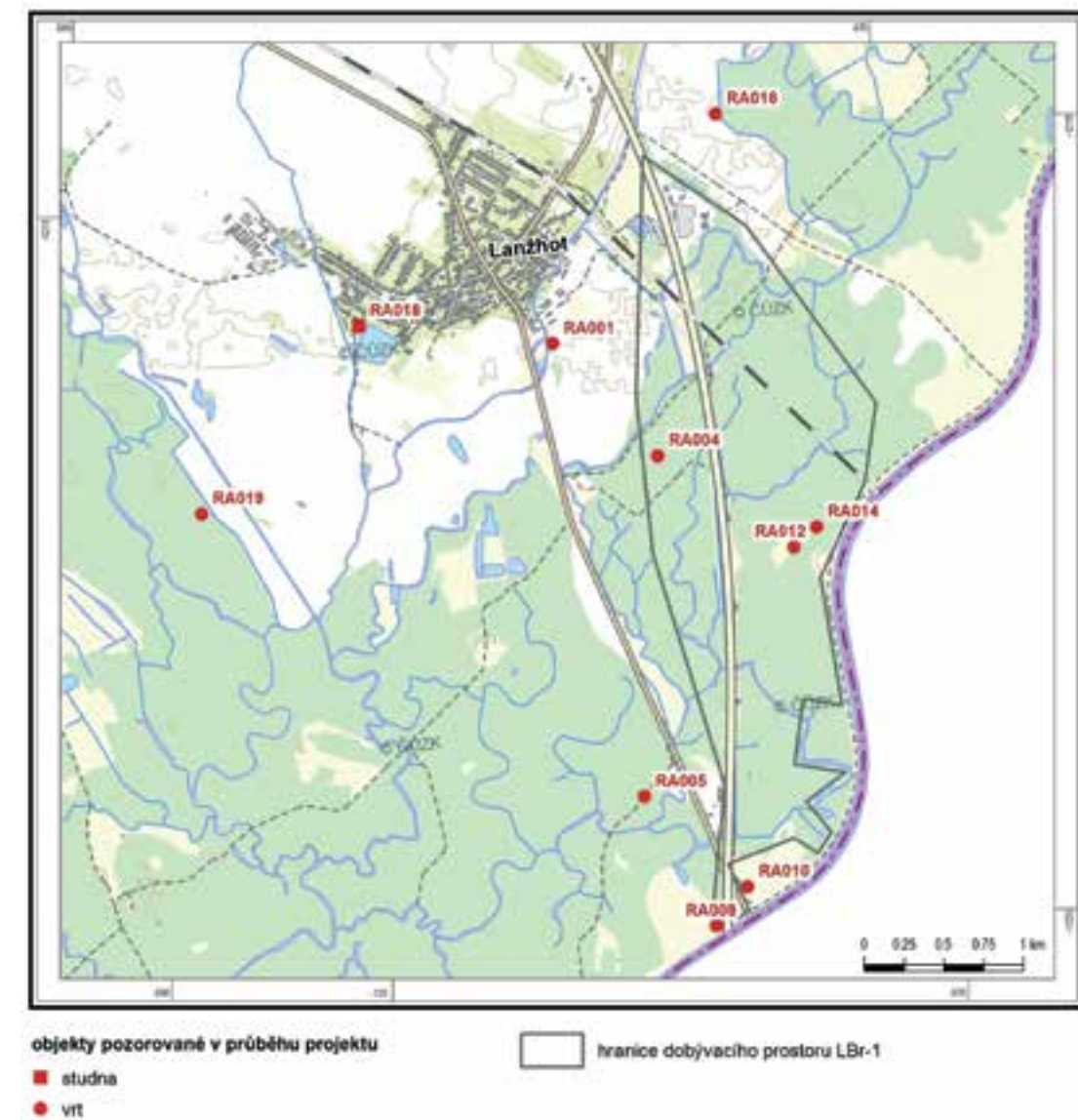
měsí písků, písčitých štěrků a jemně až hrubě zrnitých písků s proměnlivou mocností až 10 m, nejčastěji však v rozmezí 5–7 m. Toto souvrství je v podstatě tvořeno sedimentární výplní meandrujících koryt vodního toku zařiznutých do různých úrovní, která se vzájemně mnohonásobně kříží. Charakteristické je velmi nepravidelné složení hrubozrnných nesoudržných sedimentů spodního souvrství údolní nivy, které se projevuje výraznými změnami v propustnosti zvodněných sedimentů. Získaná data a informace byly předány do Aktivitě 2 pro sestavení mělkého hydrogeologického modelu lokality.

Režimní hydrogeologická měření

Na lokalitě byla v rámci projektu provedena nová hydrogeologická měření za účelem ověření základních fyzikálně-chemických parametrů a hloubky hladiny podzemní vody. Bylo provedeno celkem 5 měření v době od března 2015 do července 2016. Hydrogeologická

měření byla rozdělena tak, aby zastihla různé klimatické podmínky v průběhu roku. Sledována byla výška hladiny podzemní vody ve vrtech, teplota vody, pH a měrná elektrická vodivost (konduktivita). Naměřené hodnoty byly porovnány s vyhláškou 252/2004 (Vyhláška, kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody), sledováno bylo 9 hydrogeologických vrtů a jedna studna (viz obr. 2-10). Hloubka sledovaných objektů byla od 3,4 m do 10,5 m. Výsledky měření byly využity při dynamickém modelování mělkého oběhu podzemních vod v Aktivitě 3.

Ze čtyř vybraných objektů (RA004, RA005, RA012, RA016) byly odebrány vzorky vody na celkovou chemickou analýzu. Výsledky analýz jednotlivých prvků splňují ve všech parametrech požadavky na pitnou vodu dle vyhlášky 252/2004, vyjma vzorku RA012, kde byla mírně překročena hodnota obsahu olova. Naměřená data byla



Obr. 2-10 Pozice hydrogeologických vrtů použitých pro hydrogeologická měření.

uložena pro případné další využití do hydrogeologické databáze ČGS a exportována do geodatabáze projektu.

2.8 Geochemické parametry

Geochemické parametry úložného komplexu představují zásadní komplex informací pro další posouzení horninového masívu z hlediska možnosti ukládání CO₂. Jsou základním vstupním údajem pro geochemické modelování úložného komplexu, včetně simulace dynamických změn (předmět Aktivita 3).

Rešerše dosavadních znalostí a existujících dat

Rešerše zpracovaná pracovníky VŠB sledovala především výzkumy v oblastech těchto hlavních typů interakcí spCO₂ s prostředím:

- interakce v blízkosti injektážního vrtu – interakce CO₂ a cementu, interakce mezi CO₂, cementem a horninou, změny koncentrace roztoku vlivem rozpouštění CO₂;
- dlouhodobá interakce CO₂ s horninami a fluidy v kolektoru a v nadložních horninách – přesuny velkého množství hmot v pórovém prostoru za vysokého tlaku a s velkým teplotním gradientem; otázka snížení permeability mající přímý vliv na probíhající injektáž;
- interakce CO₂ s horninami podél únikových cest – podél injektážních vrtů, podél zlomových struktur a přes horniny pokryvných útvarů;
- úniky CO₂ z úložiště způsobující kontaminaci akviferů – rozpouštění CO₂ do akviferů v mělkých horninách způsobující oxyselení prostředí a následnou mobilizaci kovů a bitumenů;
- vytlačení rezervoárových fluid (solanek) do okolních nebo nadložních akviferů a souvisící geochemické procesy.

Výsledky rešerše byly zpracovány do ucelené zprávy (výstup 1.21), která byla podkladem pro další práce v rámci tohoto úkolu, ale i pro geochemické modelování v Aktivitě 3 a rizikovou analýzu v Aktivitě 4.

Analýza a modelování geochemických reakcí, rozpouštění a tvorby minerálů v prostředí úložiště v rezervoárových p-T podmínkách

Cílem tohoto dílčího úkolu (pod vedením VŠB) bylo otestování vhodných numerických nástrojů a jejich následné využití pro modelování migrace a interakce CO₂ s horninovým prostředím.

Bylo provedeno rovnovážné a kinetické modelování systému plyn-solanka-voda, a to ve dvou etapách. První etapa byla zaměřena na sledování bezprostředních změn v akviferu a těsnicích hornině na počátku procesu zatlačení CO₂; druhá etapa hodnotila dlouhodobé změny způsobené vlivem CO₂ na horninové prostředí. Byla sledována kvalita a rychlost modelovaných reakcí a jejich vliv na porozitu rezervoáru a kapacitu minerální sekvence. Výsledky prací jsou shrnuty ve výstupu V1.22.

Laboratorní analýzy interakcí mezi horninami, rezervoárovými fluidy a superkritickým CO₂

Na řešení tohoto dílčího úkolu spolupracovaly VŠB a ÚJV. Byly použity horninové vzorky z vrtných jader z ložisek LBr-1 a Hrušky. Vzhledem ke stáří jader pouze malé množství vzorků splňovalo požadavek soudržnosti, která je nutná pro zpracování tělísek pro dynamické experimenty, což způsobilo určitá omezení při jejich realizaci. Hodnoty ložiskových p-T podmínek pro laboratorní testy s CO₂ byly stanoveny na 40 °C a 7,5 MPa. Složení podzemní vody bylo zpracováno na základě geochemického rozboru podzemních vod z vrtu Br-45.

Na pracovišti ÚJV bylo vybráno celkem 13 vzorků (7 z lokality LBr-1 a 6 ze sousední lokality Hrušky), které byly použity pro statický experiment. Pro všechny vzorky byla před kontaktem se superkritickým spCO₂ provedena mineralogická analýza, měření rtuťové porozimetry a stanovení specifického povrchu. Vzorky byly umístěny ve statické aparatuře, ponořené do roztoku solanky v kontaktu se spCO₂ za rezervoárových p-T podmínek (viz výše). Experiment trval 75 dní a po jeho ukončení byly vzorky podrobeny opakovaným analýzám za účelem zjištění změn ve sledovaných parametrech.

Na pracovišti VŠB byly v rámci obdobného experimentu v současné době umístěny v reakční komoře RK-1 (za ložiskových p-T podmínek v ložiskové vodě, za přítomnosti CO₂) 4 vzorky z lokality LBr-1 a 9 vzorků z lokality Hrušky. Parametry experimentu byly v zájmu kompatibility výsledků obdobné jako u statického experimentu realizovaného ÚJV. V závislosti na kvalitě vzorků mělo být před a po experimentu zkoumáno mineralogické složení, kolektorské a petrofyzikální parametry a v optimálním případě i geomechanické parametry. Díky nízké kvalitě vzorků (rozpadavé, rozmáčené) došlo bohužel v průběhu experimentu k totální destrukci vzorků a nebylo na nich možno provádět žádný další výzkum kolektorských vlastností ani pevnostních parametrů. Byly proto analyzovány pouze změny v mineralogickém složení vzorků, a to pomocí RTG difrakce.

Na pracovišti ÚJV byly provedeny dále dynamické experimenty v průtočné vysokotlaké cele (obr. 211) se současným stanovením propustnosti pro vodu a superkritický CO₂. Špatná kvalita dostupných vzorků vrtných jader bohužel nedovolila připravit více než 3 vzorky pro tyto experimenty (1 vzorek z lokality LBr-1 a 2 vzorky z lokality Hrušky). Vzorky byly v dynamické aparatuře nejdříve podrobeny měření propustnosti pro vodu, následně pro spCO₂ za ložiskových p-T podmínek (7,4 MPa, 40 °C) a následně opět pro vodu. Po provedené úpravě aparatury bylo možno provádět experimenty v delších cyklech (až několik dní). Na vzorcích byly před experimentem a po něm provedeny základní analýzy (mineralogická analýza, měření rtuťové porozimetry a stanovení specifického povrchu metodou BET).

Dosažené experimentální výsledky byly následně porovnány s výstupy geochemického modelování (výstup

V1.22; viz výše). Z provedených laboratorních výzkumů i z údajů získaných modelováním vyplývá, že v průběhu procesu injektáže CO₂ a určitou dobu po ní bude docházet k chemickým reakcím mezi minerály v hornině a CO₂. Zatímco u silikátů (s výjimkou alkalických živců) lze předpokládat spíše menší změny objemu, výraznější změny nastávají u karbonátů a sulfátů. Při experimentech bylo potvrzeno pozorovatelné rozpouštění živců, a to jak draselných, tak plagioklasů, a také předpokládané chování karbonátů, tj. rozpouštění kalcitu a růst dolomitu. Jak je patrné z výsledků mineralogických analýz vzorků před a po interakci se spCO₂, minerální změny většinou nejsou příliš výrazné a často se pohybují kolem meze nejistoty analytické metody.

Geochemická syntéza

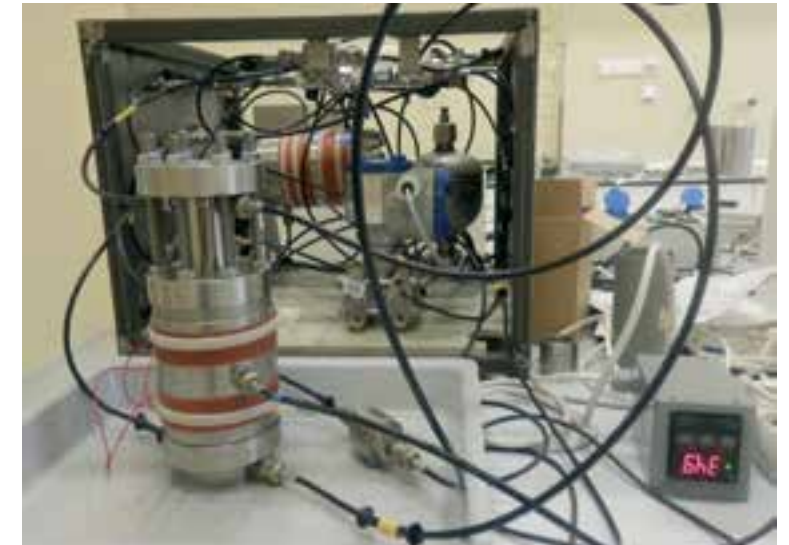
Na závěr řešení úkolu „Geochemické parametry“ bylo provedeno shrnutí a vyhodnocení poznatků získaných v rámci jednotlivých dílčích úkolů – rešeršních, modelovacích i laboratorně analytických. Výsledkem prací je výstup V1.26 „Geochemická syntéza“, v němž byla nejprve shrnuta známá fakta o geochemické stabilitě minerálních fází obsažených v analyzovaných vzorcích hornin z ložisek LBr-1 a Hrušky. Dále bylo provedeno teoretické posouzení možných změn v celkovém chemickém složení hornin před a po působení CO₂, komplexní srovnání mineralogických změn zjištěných analyticky, a na závěr byly výsledky analýz srovnány s matematickými modely z výstupu V1.22.

2.9 Geomechanické parametry

Tento úkol se od zahájení projektu potýkal s problémy se získáváním materiálu z vrtných jader, nezbytného pro provádění testů a zkoušek. Hlavním problémem byl nízký počet a kvalita dostupných vzorků. To vedlo k úpravám plánu prací, které byly jedním z hlavních bodů podstatné změny projektu schválené v úvodu r. 2016.

Rešerše dosavadních znalostí a existujících dat

Rešeršní práce probíhaly na pracovišti VŠB; jejich cílem bylo přiblížit zájmovou lokalitu z hlediska geomechaniky. Při rešerši se ukázalo, že v minulosti byla při těžbě uhlovodíků v ČR věnována otázkám geomechaniky minimální pozornost; nebyl tudíž nalezen ani jeden literární materiál věnující se jakémukoliv geomechanickému posouzení dat z předmětné lokality. Vzhledem ke skutečnosti, že v aktivní minulosti ložiska LBr-1 neproběhla žádná měření primárního napětového pole, přesné stanovení tohoto pole se ukázalo jako nemožné. Napětové pole bylo proto možné pouze odhadnout na základě teoretických úvah, empirických zkušeností a výsledků měření na nejbližších lokalitách. V databázi World Stress Map byly nalezeny záznamy z měření napětí in situ v lokalitách nacházejících se v rakouské části vídeňské pánve, v relativní blízkosti řešené lokality. Kon-



krétně se jedná o lokality Matzen a Gaenserndorf, cca 40 km jiz. od LBr-1.

Z těchto dat bylo vzhledem k relativně malé vzdálenosti od řešeného místa možné alespoň odhadnout směr hlavního a vedlejšího horizontálního napětí. Lze předpokládat, že velikost vertikálního napětí bude vzhledem k charakteru a objemové hmotnosti sedimentárních hornin (v průměru cca 2 200 kg·m⁻³) pravděpodobně stoupat s gradientem cca 22 MPa/km. Co se týče hlavního horizontálního napětí, je jakákoliv predikce velmi složitá. Nicméně se dá předpokládat, že směr hlavního horizontálního napětí v oblasti jižní partie české části Vídeňské pánve bude přibližně Z–V, a bude se směrem na sever pootáčet ve směru hodinových ručiček až ke směru S–J.

Velikost jednotlivých složek horizontálních napětí bude v různých horninových typech rozdílná. Dá se předpokládat, že ve svrchní části bude hlavní horizontální napětí mít hodnotu vyšší než vertikální složka napětí, nicméně s rostoucí hloubkou by se měl tento rozdíl postupně snižovat. V hloubkách pod 3 km by již mělo převládat vertikální napětí nad horizontálními.

Laboratorní zkoušky pro stanovení geomechanických vlastností hornin rezervoáru a těsnicích nadložních vrstev

Práce probíhaly paralelně na pracovištích VŠB a IRIS. Vzhledem ke stáří materiálu bylo velmi problematické odvrtat celistvé vzorky bez jejich porušení (výplach dělal problémy s konzistencí, a to zejména u jílovitých hornin). Materiálu z LBr-1 byl nedostatek, proto se využily i jádra z ložiska Hrušky jako analogické lokality. Přes počáteční obtíže se nakonec podařilo určitě množství použitelných vzorků odebrat a laboratorní zkoušky mohly být na obou pracovištích provedeny.

VŠB měla k dispozici 2 vzorky z lokality LBr-1 (Br-35 a Br-54) a 9 vzorků z lokality Hrušky (Hr-33, Hr-150, Hr-43 a 43A, Hr-5, Hr-150, Hr-5-vz. 1, Hr-52 a Hr-150A). Na všech

Obr. 2-11 Dynamická aparatura použitá k experimentům v ÚJV.

zmíněných vzorcích byly postupně prováděny UCS testy (unconfined compressive strenght test) a brazilský test.

Do laboratoří IRIS ve Stavangeru bylo odesláno celkem cca 15 kg úlomků vrtných jader různých velikostí. Materiál pocházel převážně z analogické lokality Hrušky, nicméně několik vzorků bylo rovněž z ložiska LBr-1. Z těchto hornin byly odebírány vzorky o průměru 37,1 mm. Během procesu bylo otestováno několik různých postupů, než byl nalezen nejlepší způsob, jak vzorky z vrtných jader získat. Úspěch procesu závisel nejen na integritě samotného vzorku, ale i na použitém chlazení (voda nebo Isopar H) a na způsobu odběru (jádrové vrtnání, soustružení).

Jílovité horniny měly zpravidla tendenci se během vrtnání zcela rozpadat, zatímco pískovcové vzorky obvykle tento proces vydržely. Celkem byly nakonec pro geomechanické zkoušky k dispozici 3 vzorky z lokality LBr-1 a 13 vzorků hornin z lokality Hrušky.

V závislosti na délce (L) a průměru (D) vzorku byl zpracován plán testů podle následujícího pravidla:

- $L < D$ – brazilské testy (nejrozšířenější metoda zjišťování tahové pevnosti v příčném tahu),
- $D < L < 2D$ – hydrostatické testy,
- $L \Rightarrow 2D$ – buď UCS-testy („unconfined compressive strenght“ test), nebo triaxiální zkoušky.

Výsledkem těchto testů jsou elastické parametry (Youngův modul a Poissonovo číslo z hydrostatických a UCS testů a triaxiálních zkoušek); mez pevnosti v tahu z brazilského testu, mezní síla kolapsu pórů z hydrostatických testů a mez pevnosti ve smyku z UCS a triaxiálních zkoušek). Na získaných vzorcích mohlo být provedeno celkem 21 brazilských zkoušek (obr. 2-12),

2 hydrostatické testy, 6 testů UCS a 11 triaxiálních zkoušek. Brazilské a UCS testy se prováděly za běžných teplotních podmínek, hydrostatické a triaxiální zkoušky při 43 °C.

Výsledky testů jsou podrobně popsány ve výstupu V1.28.

Změny geomechanických vlastností v důsledku chemických změn

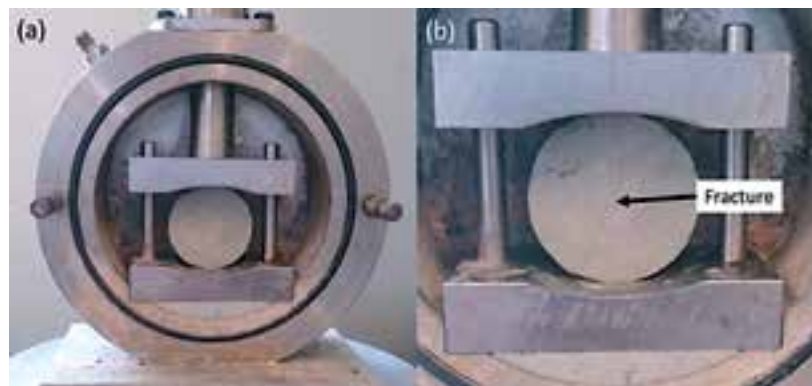
V rámci těchto prací byly pokusy na čtyřech vzorcích

odebraných z vrtných jader: jednom porézním vzorku rezervoárového typu z podloží ložiska z vrtu Br-45, jednom nepropustným vzorku z rezervoárového obzoru z vrtu Br-52, který byl pro experimenty rozdrčen, a dvou nepropustných vzorcích odpovídajících těsnicí hornině z vrtu Hr-43 (podloží ložiska), které byly ponořeny do kapalného CO₂. Experimenty byly doplněny laboratorními analýzami, geochemickým modelováním a simulací.

Při experimentálních a modelovacích pracích bylo dosaženo tyto hlavních výsledků:

- Po injektáži CO₂ do vzorku horniny rezervoárového typu z vrtu Br-45, nasyceného solankou, se oproti původnímu složení zvyšuje v solance obsah vápníku, hořčíku, křemíku a draslíku. Při experimentech prováděných za rezervoárových podmínek při tlaku 100 barů (10 000 kPa) teplotě 43 °C nebyly zaznamenány významné změny v koncentraci sodíku, sulfátů (SO₄²⁻), železa a chloridů (Cl⁻).
- Pro drčený vzorek horniny z vrtu Br-52 byly zjištěny zvýšené koncentrace Na, Ca, Mg, K, Cl, SO₄²⁻ a Si, rovněž při tlaku 100 barů (10 000 kPa) a teplotě 43 °C. Nebyly zjištěny změny v koncentraci Fe.
- Ve vzorku z vrtu Hr-43 (analog těsnicí horniny) bylo zjištěno výrazné zvýšení koncentrací Na, Mg, K, SO₄²⁻ a Si, a snížení koncentrace Ca po vystavení působení CO₂ rozpuštěného ve vodě po dobu 3 měsíců při tlaku 100 barů (10 000 kPa) a teplotě 43 °C.
- Petrofyzikální měření na vzorku rezervoárového typu z vrtu Br-45 před a po vystavení účinkům CO₂ ukázaly poměrně významné změny v porositě a permeabilitě (o konci pokusu. Porozita se snížila z 29,3% na 27,6% (o 5,8%) a permeabilita poklesla z 1056 mD na 634 mD (o téměř 40 %).
- Pro modelování rovnovážných stavů vzorků jader syčených fluidy byl použit program PHREEQC-3. Bylo použito mineralogické složení hornin podle výsledků analýz vzorků z vrtů Br-45 a Br-52. Výsledky založené na výpočtech byly použity pro určení modelových koncentrací iontů a pH. Simulační trendy vykazaly dobrou shodu s laboratorními experimenty.
- Geochemické výsledky studia rovnovážných poměrů na vzorku horniny rezervoárového typu z vrtu Br-45

Obr. 2-12 Brazilská zkouška v laboratořích IRIS – (a) intaktní vzorek před zahájením testu; (b) vzorek se vzniklou trhlinou po aplikaci zatížení.



po vystavení účinkům CO₂ ukazují, že změny porozity a permeability mohou být způsobeny rozpouštěním karbonátových a silikátových minerálů, jakou jsou kalcit, dolomit a albit a srážením jiných silikátových minerálů, jako jsou křemen a K-slídy. Tyto minerální změny lze očekávat ve vzdálenosti 0 až 1,5 cm od povrchu vzorku. Ve větší vzdálenosti lze očekávat, že vzorek bude v rovnováze se solankou nasycenou CO₂.

- Program PHREEQC-3 pracuje s rovnovážnými poměry. Silikáty však mají pomalou reakční kinetiku a nelze očekávat, že dosáhnou rovnováhy s horninovou fluidou během ukládání CO₂ v ložisku LBr-1. Snížení porosity a permeability je tedy nutno přičíst zejména rozpouštění karbonátů a následnému vysrážení sekundárních minerálů s odpovídajícím chemickým složením.

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) a energiově disperzní rentgenová spektrometrie (EDS) byly aplikovány na drčených vzorcích z vrtu Br-52, jednak bez vlivu CO₂, jednak po expozici CO₂. Jejich srovnání přineslo následující závěry:

- Vzorek vystavený účinkům CO₂ odebraný ze spodní části kolony (u výstupu), měl po zaplavení CO₂ vyšší koncentraci jemných částic a jílových minerálů. Bylo zjištěno, že vzorek je v těchto místech značně konsolidován. To by mohlo být způsobeno migrací jemných částic v případě zaplavení vzorku odshora dolů, případně rozpouštěním a opětovným vysrážením minerálů. EDS analýzy potvrzují vyšší koncentrace křemene, hliníku, draslíku a železa ve spodní části zaplaveného vzorku, což je ve shodě s vyšším obsahem jílu.
- Ve výstupní části kolony se zaplaveným vzorkem byly pozorovány zvýšené koncentrace vápníku, reflektující pravděpodobně rozpouštění a srážení kalcitu nebo dolomitu v drčeném horninovém vzorku. To také odpovídá poklesu obsahu vápníku ve vstupní části kolony. Na vstupu bylo dále pozorováno snížení obsahu hliníku a případně draslíku, které lze vysvětlit, jak je uvedeno výše, migrací nebo rozpouštěním jílových minerálů.
- V horní části zaplaveného vzorku v koloně byl zjištěn povlak mnoha zrn s velmi vysokým obsahem uhlíku. Materiál má amorfní nebo polykrystalický vzhled. EDS analýzy potvrdily vyšší obsah uhlíku u zaplaveného vzorku ve srovnání s dalšími dvěma vzorky, které nebyly vystaveny působení CO₂.
- Přesná identifikace jílu a amorfní vrstvy pomocí SEM a EDS je obtížná. Jílové minerály mají složení podobající se kaolinitu a illitu spolu s chloritem a montmorillonitem. Hlavní rozdíly nalezené ve složení jílových minerálů ze studovaného vzorku jsou v obsahu Mg. Nebyly však zjištěny žádné velké rozdíly, a nezdá se, že by nastaly podstatné změny ve složení jílových minerálů mezi vzorky zaplavenými a nezaplavenými CO₂. Výsledky prací byly průběžně předávány k dalšímu využití při geomechanickém modelování v Aktivitě 3 a byly rovněž zahrnuty do závěrečné geomechanické syntézy.

Geomechanická syntéza

Geomechanické a doplňkové geochemické zkoušky byly provedeny za účelem poznání stabilních podmínek možného úložiště CO₂ v bývalém ložisku LBr-1 a pro stanovení limitních fyzikálních podmínek tak, aby nedošlo k úniku CO₂ do nadložního prostředí. Byla posuzována možná rizika souvisící s těmito jevy:

- změny pórového tlaku v souvislosti s jeho nárůstem při injektáži CO₂ a poklesem při extrakci uhlovodíků, které by mohly způsobit tahové rozpukání, kompakci horniny nebo reaktivaci zlomů;
- ovlivnění mechanických vlastností rezervoárových hornin geochemickými reakcemi indukovanými smícháním CO₂ s přítomnými rezervoárovými fluidy.

Na základě provedených laboratorních experimentů, dostupných informací a strategie injektáže navrhované ve výsledcích Aktivitě 3 (maximálně 30% přetlak), s přihlédnutím k malému množství zachovaných vrtných jader, předpokládanému napětovému stavu horninového masivu, směru tlaků a pórovému tlaku byly vyvozeny následující závěry:

- Nepředpokládají se žádné mechanické destabilizace ložiska v důsledku změn pórového tlaku. Podle výsledků provedených zkoušek je opětovná aktivace existujícího systému zlomů nepravděpodobná, stejně jako porušení nadložních vrstev tahovými trhlinami. K poruchám v důsledku kompakce hornin vlivem poklesu pórového tlaku by nemělo dojít, protože síla potřebná ke kolapsu pórů překračuje efektivní tlak při úplném vyčerpání ložiska. Možnost reaktivace zlomů je podrobněji popsána ve výstupu V3.6, kde je použit k interpretacím statistický přístup.
- Byly zjištěny významné chemické reakce (viz výše).
- Chemické reakce mohou mít za následek změnu mechanických vlastností nadložních sedimentů (viz výše). Nedostatečně základní informace o horninovém napětí a jeho směrech a pórovém tlaku (viz výstup V1.27) představují značnou nejistotu pro závěry vyplývající z prací v úkolu A1.7. Kromě toho, malá dostupnost reprezentativních vzorků ze zbytků vrtných jader vede k dalším otázkám týkajícím se použití naměřených výsledků pro využití v případě lokality LBr-1 jako rezervoáru pro ukládání CO₂. Základní předpoklady a relevantní experimentální výsledky byly přeneseny k využití do aktivty 3.6, kde se řeší strategie injektáže ve vztahu modelování toků fluid (včetně otázek hydraulického štěpení a opětovné aktivaci zlomů protínajících rezervoár).

Po zjištění, že geochemické procesy mohou ovlivňovat geomechanické parametry, zůstává obava, že by to mohlo ohrozit stabilitu rezervoáru v průběhu času. Tyto procesy by mohly vést ke kompakci (snížení porosity a propustnosti) v jinak stabilních rezervoárových okrcích. Významná kompakce rezervoáru, která může nastat při kolapsu pórů, může vést ke snížení propustnosti a přerozdělení napětí. Tyto jevy by mohly způsobit opětovnou aktivaci zlomů a změny v napětí nadložních hornin. Rozsah

těchto vlivů na LBr-1 se však nezdá být zásadní, zejména s ohledem na dlouhodobou těsnicí schopnost nadloží; v tomto směru jsou však zapotřebí další studie.

Navzdory nejistotě a celkově omezenému přímo použitelných výsledků nebyla zjištěna zásadní omezení, která by znemožnila využití lokality jako podzemního úložiště CO₂. Na základě všech dosavadních výsledků a znalostí lze předběžně konstatovat, že injektáž do bývalého ložiska ropy a plynu LBr-1 je z hlediska rezervoárové geomechaniky bezpečná.

2.10 Seismicita

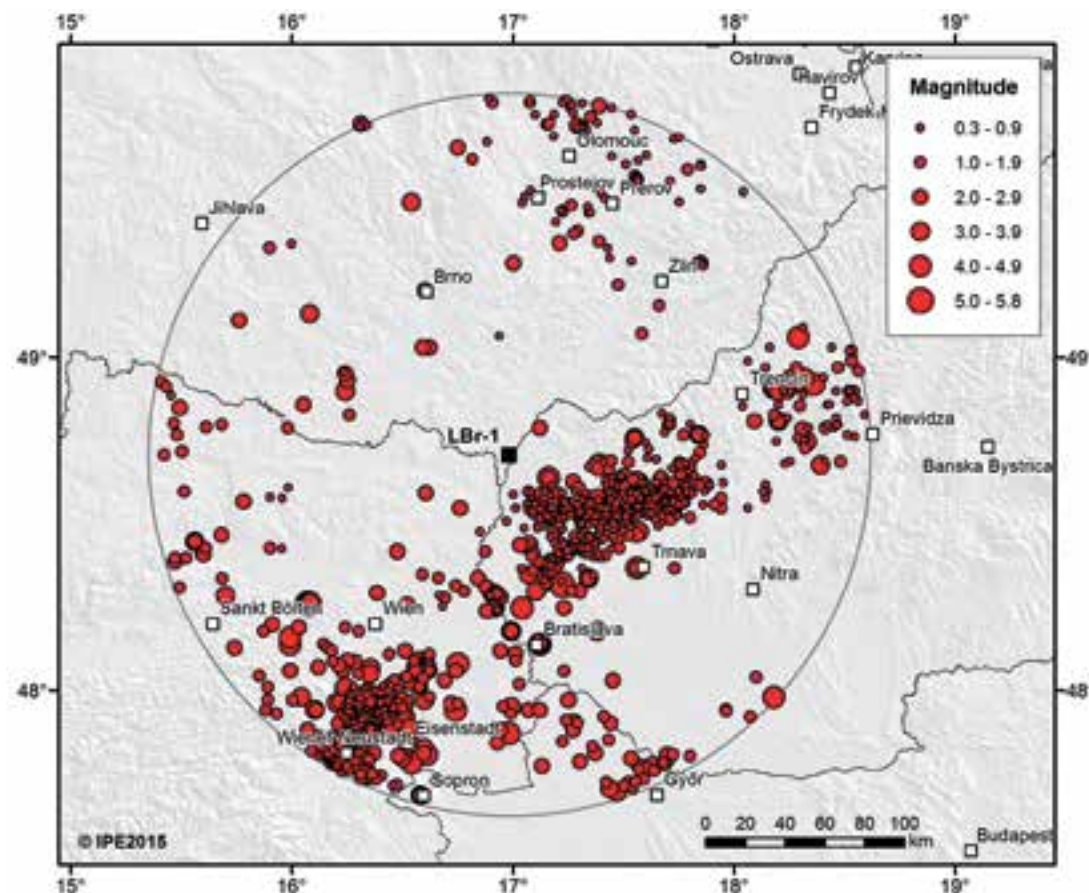
Na pracovišti partnera UFZ Byl sestaven katalog zemětřesení pro širší okolí LBr-1. Do katalogu byly zahrnuty jevy z území ČR, Slovenska, Rakouska a Maďarska ve vzdálenosti do 120 km od těžiště lokality LBr-1. Takto velké území dobře dokladuje jak lokální seismicitu, tak seismicitu zkoumaného místa v širším regionálním kontextu. Z relevantní oblasti byly shromážděny všechny dosavadní katalogy a seznamy historických zemětřesení s makroseismickými účinky. Všechny údaje byly revidovány a ověřovány v původních zdrojích (kroniky, noviny, dopisy apod.). Byly doplněny informace o nových, instrumentálně zaznamenaných zemětřeseních s lokálním magnitudem $ML \geq 0,3$. Všechny získané

informace byly porovnávány; byly vyřazeny duplicita a falešná zemětřesení (např. exploze). Některá zemětřesení byla relokalizována, u některých jevů bylo nově určeno magnitudo. Výsledný katalog zahrnuje celkem 1478 jevů s lokálním magnitudem ML v rozmezí 0,3 – 5,8 z období 1283 – 2015. Nejsilnější zaznamenané seismické jevy jsou zemětřesení z roku 1590 s epicentrem u Neulengbachu (Rakousko; 84 km od LBr-1) a magnitudem $ML=5,8$ a dále jev z roku 1906 s epicentrem u Dobré Vody (Slovensko; 38 km od LBr-1) a magnitudem $ML=5,7$. Nejbližším zaznamenaným seismickým jevem je zemětřesení z roku 1874 s epicentrem u Kopčan na Slovensku (13 km od LBr-1) a magnitudem $ML=2,6$. V okruhu 30 km od LBr-1 bylo zaznamenáno 106 zemětřesení s maximálním magnitudem $ML=4,3$.

Mapa epicenter seismických jevů zaznamenaných ve vzdálenosti do 120 km od lokality LBr 1 je na obr. 2-13.

Na základě rešerše dostupných podkladů a vlastních analýz byly zhodnoceny seismogeologické podmínky v modelové lokalitě LBr-1 a vytvořeny startovní rychlostní modely. V souladu s účelem monitorování byly zkompilovány dvě skupiny rychlostních modelů pro regionální a lokální měřítko monitorování. Vzhledem k nedostatku registrací ve studované oblasti byly v rámci tohoto projektu zkompilované modely pouze porovnány a na základě budoucích registrací by měly být dále upřesněny.

Obr. 2-13 Mapa epicenter seismických jevů zaznamenaných ve vzdálenosti do 120 km od lokality LBr1.



Do skupiny regionálních rychlostních modelů byly zahrnuty rychlostní řezy, odvozené z refrakčně seismických experimentů a z registrací regionálních lomových odpařů, model používaný rakouskými seismologickými institucemi a referenční globální model IASPEI91. Tyto rychlostní modely jsou vrstevnaté, s lineárním gradientem ve vrstvách, případně trojrozměrné. Jako lokální jsou ozna-

čeny rychlostní modely sedimentární výplně vídeňské pánve. Ty byly sestaveny na základě seismokarotážních měření, korelace seismických profilů s vrty a komplexní rychlostní analýzy pro zpracování seismických profilů.

Získané informace a výsledky byly shrnuty v projekto-
vém výstupu V1.32 a předány k využití při seismologic-
kém monitoringu v Aktivitě 5.

LITERATURA

- Alnes, H. – Eiken, O. – Nooner, S. – Sasagawa, G. – Stenvold, T. – Zumbege, M. (2011): Results from Sleipner gravity monitoring: updated density and temperature distribution of the CO₂ plume. *Enege Procedia* 4 (2011) 5504–5511.
- Arzmüller, G. – Buchta, Š. – Ralbovský, E. – Wessely, G. (2006): The Vienna basin. – In Golonka, J., – Picha, F. J. (Eds.) *The Carpathians and Their Foreland: Geology and Hydrocarbon Resources*. AAPG Memoir, 84, 191–204. Tulsa, USA.
- Beidinger, A. – Decker, K. (2016): Paleogene and Neogene kinematics of the Alpine-Carpathian fold-thrust belt at the Alpine-Carpathian transition. – *Tectonophysics* 690 (2016) 263–287.
- Bílek, K. (1953a): Výpočet zásob plynu a nafty ložiska Brodské k 1. 7. 1953. – MS Archiv MND Hodonín.
- Bílek, K. (1953b): Výroční geologická zpráva o průzkumné vrtné činnosti v oblasti Brodské za rok 1952. – MS Archiv MND Hodonín.
- Bílek, K. (1974): Ložiska ropy a plynu v Slovenskej časti viedenskej pánve. – *Mineralia Slovaca*, Vol. 6, No 5–6, 399–498. Bratislava.
- Blížkovský, M. (1961): Detailní gravimetrický průzkum ve slovenské části vídeňské pánve. – *Československé naftové doly*.
- Burchfiel, B. C. – Royden, L. (1982): Carpathian Foreland Fold and Thrust Belt and its Relation to Pannonian and Other Basins. – *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 66, 9, 1179–1195. Tulsa.
- Decker, K. – Peresson, H. – Hinsch, R. (2005): Active tectonics and Quaternary basin formation along the Vienna Basin Transform fault. – *Quaternary Science Reviews*, 24, 307–322.
- Dlabač, M. (1971): Dvě studie o sedimentaci badenu (trotton) vídeňské pánve. – *Geol. Práce*, Spr. 56. 89–108. Bratislava.
- Fiala, M. (1964): Projekt otvírky ložiska Brodské – vysoká kra – I. etapa. – MS Archiv Nafta Gbely.
- Fiala, M. (1966): Projekt otvírky ložiska Brodské – vysoká kra – II. etapa. – MS Archiv Nafta Gbely.
- Fodor, L. (1995): From transpression to transtension: Oligocene-Miocene structural evolution of the Vienna basin and the East Alpine – Western Carpathian junction. – *Tectonophysics*, 242, 151–182. Amsterdam.
- Fodor, L. – Francú, J. – Krejčí, O. – Stráník, Z. (1995): Paleogeographic and tectonic evolution of the Carpathian Flysch Belt of the southern Moravia (Czech Republic). – *Geol. Soc. Greece, Sp. Publ.*, No. 4, Proceedings of the Congress of the Carpatho-Balkan Geological Association, September 1995, 31–36. Athens, Greece.
- Fodor, L. – Francú, J. – Krejčí, O. – Stráník, Z. (1996): Paleogeographic and tectonic evolution of the Carpathian Flysch Belt of south Moravia. – *Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment*, III, 1/96. Brno.
- Fodor, L. – Csontos, L. – Bada, G. – Györfi, I. – Benkovics, L. 1999: Tertiary tectonic evolution of the Pannonian basin system and neighbouring orogens: a new synthesis of palaeostress data. – In Durand, B. – Jolivet, L. – Horváth, F. – Sérane, M. (Eds.): *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*. Geological Society, Special Publications, 156, 295–334. London.
- Grill, R. (1941): Stratigraphische Untersuchungen mit Hilfe von Mikrofauna im Wiener Becken und in den benachbarten Molassenteilen. – *Oil und Kohle*, 337, 595–601. Berlin.
- Hinsch, R. – Decker, K. – Wagreeich, M. (2005): 3-D mapping of segmented active faults in the southern Vienna Basin. – *Quaternary Science Reviews*, 24, 321–336.
- Hölzel, M. – Decker, K. – Zámolyi, A. – Strauss, P. – Wagreeich, M. (2010): Lower Miocene structural evolution of the central Vienna Basin (Austria). – *Marine and Petroleum Geology* 27, 666–681.
- Hromec, J. – Kolesík, J. (1964): Výpočet zásob nafty a zemního plynu ložiska Brodské – vysoká kra k 1. 10. 1964. – MS ŠGÚDŠ – MS archiv Geofond Bratislava.
- Hubatka, F. – Krejčí, O. (1996): A contribution to the pull-apart theory of origin of the Vienna basin based on an analysis of geological and reflection-seismic data. – *Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment*, III, 1/96. 2–4. Brno.
- Káňa, K. (1993): Prognózní možnosti těžebních efektů na ložisku Brodské – sever. – MS archiv MND Hodonín.
- Káňa, K. (1998): Závěrečné zhodnocení těžby živíc na nalezišti Brodské – sever včetně výhledového využití ložiska. – MS archiv MND Hodonín.
- Kováč, M. – Bielik, M. – Hók, J. – Kováč, P. – Kronome, B. – Labák, P. – Moczo, P. – Plašienka, D. – Šefara, J. – Šujan, M. (2002): Seismic activity and neotectonic evolution of the Western Carpathians (Slovakia). – In Cloething, S. A. P., L. – Horváth, F. – Bada, G. – Lankreijer, A., C. (Eds.): *Neotectonics and surface processes: the Pannonian Basin and Alpine/Carpathian System*. – Stephan Mueller Special Publication Series Vol. 3, pp. 167–184. Copernicus GmbH, Katlenburg-Lindau.
- Kožík, I. (2015): Sanace starých ekologických zátěží – nedostatečně zlikvidovaných sond po těžbě ropy a zemního plynu v sektoru IV. CHOPAV Kvartér řeky Moravy. Závěrečná

- zpráva z provedené relikvidace sondy Brodské – 72. – MS archiv MND Drilling & Services a.s.
- Kröll, A., – Gnojek, I. – Heinz, H. – Jiříček, R. – Meurers, B. – Seiberl, W. – Steinhauser, P. – Wessely, G. – Zych, G. (1993): Wiener Becken und angrenzende Gebiete. Geologische Themenkarten der Republik Österreich 1 : 200 000. – Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Krs, M. – Roth, Z. (1979): Insubric-Carpathian Tertiary block-system, its origin and desintegrations. – Geol. Zbor. Geologica carpath., 30, 1, 3–17. Bratislava.
- Odstřil, J. (1964): Tíhový průzkum jv. svahů Českého masivu mezi Hustopečemi a Lanžhotem. – MS archiv MND Hodonín.
- Picha, F.J. – Stráník, Z. – Krejčí, O. (2006): Geology and Hydrocarbon Resources of the Outer Western Carpathians and Their Foreland, Czech Republic. – In Golonka, J. – Picha, F. J. (Eds.) The Carpathians and Their Foreland: Geology and Hydrocarbon Resources. – AAPG Memoir, 84, 49–175. Tulsa, USA.
- Prochác, R. – Pereszlényi, M., – Sopková, B. (2002): Tectono-sedimentary features in 3D seismic data from the Moravian part of the Vienna Basin. – First Break, Volume 30, April 2012. 49–56.
- Ratschbacher, L. – Merle O. (1991): Lateral extrusion in the Eastern Alps, Part 1: Boundary conditions and experiments scaled for gravity. – Tectonics, 10, 2, 245–256. Washington.
- Ratschbacher, L. – Frisch, W. – Linzer H.-G., – Merle, O. (1991): Lateral extrusion in the Eastern Alps, Part 2: Structural analysis. – Tectonics, 10, 2, 257–271. Washington.
- Roth, Z. (1980): Západní Karpaty – terciérní struktura střední Evropy. – Knih. Ústř. Úst. geol., 55, 128 str. Praha.
- Sperner, B. – Ratschbacher, L. – Nemcok, M. (2002): Interplay between subduction retreat and lateral extrusion: Tectonics of the Western Carpathians. – Tectonics, 21, 6, 1051–1075. Washington.
- Šelle, M. (1959): Výroční geologická zpráva o výsledcích geologickovyhledávacích a průzkumných prací v oblasti Brodské a Lanžhot za léta 1955, 1957 a 1958. MS archiv MND Hodonín.
- Šelle, M. – Němec, F. – Kolesík, J. (1960): Výpočet zásob nafty a zemního plynu ložiska Brodské k 1. 7. 1960. MS archiv MND Hodonín.
- Tomek, Č. – Dvořáková, L. – Ibrmajer, I. – Jiříček, R. – Koráb, T. (1987): Crustal profiles of active continent collisional belt: Czechoslovak deep seismic reflection profiling in the West Carpathians. – Geophys. J. Roy. astron. Soc., 89, 383–388. London.
- Zoetemeijer, R. – Tomek, C. – Cloething, S. (1999): Flexural expression of European continental lithosphere under the Western Outer Carpathians. – Tectonics, 18, 5, 843–861. Washington.

SEZNAM VÝSTUPŮ AKTIVITY 1

- V1.1 Datový soubor se základními geografickými informacemi o lokalitě a souřadnicemi vrtů
- V1.2 Digitální model terénu
- V1.3 Geografická a pedologická charakteristika lokality
- V1.4 Vrtná databáze s veškerými údaji z archivních vrtů
- V1.5 Strukturní mapy a řezy
- V1.6 Popisy vrtných jader a realizace odběrů vzorků pro analýzy
- V1.7 Výsledky analýz vzorků – stanovení petrografického složení hornin z makrozorků a výbrusů pomocí metody mikroskopie a RTG difrakce
- V1.8 Zpráva o biostratigrafickém zařazení sedimentů z ložiskových a těsnicích obzorů
- V1.9 Litofaciální analýza a sekvenční stratigrafie rezervoáru a jeho nadloží
- V1.10 Datový soubor seismických dat a interpretací připravený k importu do 3D geologického modelu
- V1.11 Datový soubor archivních karotážních dat
- V1.12 Datový soubor nově vypočtených karotážních dat a textová zpráva o provedených pracích
- V1.13 Soubor map a hloubkových řezů odvozených z archivních gravimetrických a magnetometrických dat a textová zpráva
- V1.14 Gravimetrické mapy vytvořené na základě nového měření
- V1.15 Závěrečná zpráva o provedeném gravimetrickém měření
- V1.16 Datový soubor s archivními údaji o rezervoárových parametrech hornin
- V1.17 Datový soubor s výsledky nových petrofyzikálních měření
- V1.18 Datový soubor a textová zpráva s přehledem základních údajů o vlastnostech rezervoárových fluid
- V1.19 Datový soubor s údaji o p-T podmínkách v rezervoáru a o historii těžby
- V1.20 Zpráva o situaci v mělkém oběhu vod na ložisku Brodské včetně datového souboru
- V1.21 Rešerše znalostí o interakcích CO₂ s horninovým prostředím
- V1.22 Výstupy modelování geochemických reakcí – zpráva
- V1.23 Výsledky stanovení geochemických parametrů v laboratoři – datový soubor
- V1.24 Výsledky stanovení geochemických parametrů v laboratoři – zpráva
- V1.25 Detailní popis vlivu CO₂ na rezervoárové a nadložní těsnicí horniny za ložiskových podmínek – zpráva
- V1.26 Geochemická syntéza
- V1.27 Rešerše znalostí a dat vztahující se ke geomechanickému posouzení lokality – zpráva a datový soubor
- V1.28 Vyhodnocení laboratorních geomechanických zkoušek na vzorcích z předmětné lokality – zpráva a datový soubor
- V1.29 Vyhodnocení analýz iontové chromatografie a kvantitativní geochemie
- V1.30 Vyhodnocení laboratorních experimentů s drcenými vzorky – zpráva a datový soubor
- V1.31 Geomechanická syntéza
- V1.32 Seismologický katalog zájmové oblasti

3. Trojrozměrný statický geologický model

3.1 Pojetí konstrukce 3D modelu

Konstrukce trojrozměrného (3D) statického geologického modelu úložného komplexu byla náplní projektové Aktivity 2. Hlavním cílem prací bylo vytvoření takového 3D statického geologického modelu, který by dokumentoval, resp. co nejvíce se přibližoval skutečnému geologickému prostředí na vytěženém ložisku ropy a plynu LBr-1 (samostatně severní části ložiska Brodské), a současně umožňoval vykonávat experimenty související s dynamickým modelováním, tj. simulací vlastního ukládání CO₂ do víceméně reálného geologického prostředí.

Konstrukce modelu potenciálního úložiště, resp. úložného komplexu LBr-1, vychází z analýzy dostupných geologických, geofyzikálních, technických a laboratorních údajů, zejména karotážních měření jednotlivých vrtů, čerpacích zkoušek, 3D seismických měření, analýz ložiskových fluid (ropy, vody, plynu), petrografických popisů vrtných jader apod. Geometrický model byl sestaven v dohodnutém souřadnicovém systému Gauss-Krüger A, 5-42, 3. poledníkový pás. Dílčím objektům (jednotlivým horizontům a vrstvám) byly postupně přiřazovány vlastnosti, např. strukturní hloubky, mocnosti, litologické složení, petrofyzikální vlastnosti, těsnicí účinky zlomů atd.

Model dokumentuje plošný a vertikální rozsah úložného komplexu, vlastní geologickou strukturu tvořící fyzikální past úložiště, včetně nadložních těsnicích horizontů a okolních formací, zejména komunikujících akviferů. Dále umožňuje zobrazit distribuci petrofyzikálních vlastností rezervoárové horniny, zejména pórovitosti a propustnosti nebo provádět výpočty objemu pórového prostoru a původních objemů ropy a plynu. Současně lze na jeho základě podrobněji analyzovat systém zlomů anebo přítomnost uměle vytvořených migračních cest v případě nekvalitní zapažnicové cementace vrtů. Výsledky statického modelu sloužily jako vstupní data pro dynamické modelování průběhu ukládání CO₂. Pro posouzení rizika migrace fluid do mělce uložených akviferů byl také vytvořen zjednodušený model nadloží úložného kolektoru.

3.2 Zdrojová data

Většina potřebných údajů byla získána především z databáze Geofondu a od dřívějšího operátora ložiska – společnosti MND a.s. Byly využity i některé další údaje z veřejně dostupných zdrojů. Zásadní význam pro další práce na posuzování geologické struktury jako potenciálního úložiště mají geodetické, geologické a těžební údaje o vrtech, karotážních měření z vrtů a 3D seismická měření. Cenné informace o ložisku LBr-1 jsou v souhrnných geologických zprávách popisujících lo-

žisko a jeho okolí (Bílek 1974), ve zprávách o výpočtu zásob (Šelle et al. 1960, Kobich a Olšovský 1986) anebo zprávách zhodnocujících výsledky těžby (Káňa 1998), které obsahují strukturní mapy na různé stratigrafické úrovně (Čajka a Štefanová 1976). Další důležité informace o ložisku jsou pak v syntetizujících zprávách pro celou oblast Vídeňské pánve (Čajka a Štefanová 1976, Jiříček 2002, Prochác 2013). Získaná data (obdobně jako všechna ostatní data shromážděná, naměřená nebo jinak vytvořená v rámci projektu) byla uložena do projektové geodatabáze ve standardních formátech tak, aby byla využitelná po jednoduché úpravě v různých programových prostředích (např. Petrel, Star, Eclipse, OpendTect, Golden Software).

Vrty

Základní informace o 3D stavbě oblasti ložiska LBr-1 byly získány z archivních složek 54 vrtů. Primární data byla náležitě upravena a zahrnují:

- souřadnice vrtů v dohodnutém souřadnicovém systému, nadmořské výšky ústí vrtů a konečné hloubky,
- výsledky inklinometrických měření vrtů odklon od vertikály, azimut,
- hloubky základních stratigrafických rozhraní v geologickém profilu vrtů, postupně zpřesněné při korelaci elektrokarotážních měření.

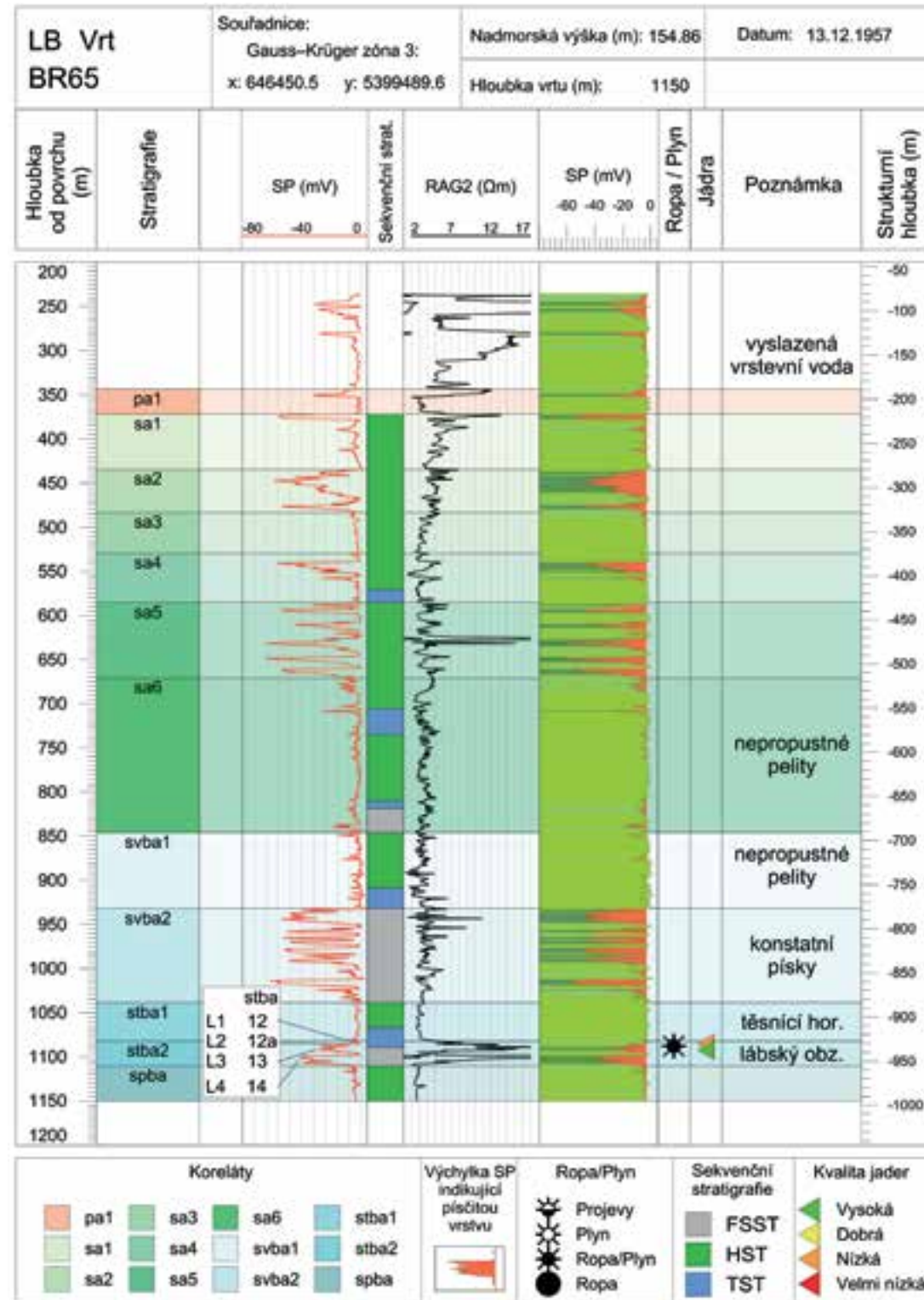
Karotážní data

Dostupné karotážní záznamy z 54 vrtů na lokalitě LBr-1 a v jejím okolí obsahují křivky odporové karotáže (RAG2) a spontánní polarizace (SP) ve formátu LAS. Dalším zdrojem dat jsou radiometrická měření (GK, NGK) provedená na několika relikvidovaných vrtech ložiska LBr-1 za účelem ověření výskytu horizontů nasycených uhlodíky, původně nepodchycených nebo druhotně nasycených, a provedení opatření pro zabránění možnému úniku fluid z těchto poloh.

Seismická data

Seismická data představují jeden z hlavních informací a datových vstupů pro tvorbu 3D statického geologického modelu. Na základě dohody s původním operátorem ložiska byla pro potřeby projektu poskytnuta data trojrozměrné (3D) seismiky ve dvou verzích. Základní verze, tzv. předsoučtová časová migrace RMO („residual moveout“) byla využita pro mapování stratigrafických rozhraní, povrchů horizontů, interpretaci tektoniky a sekvenční seismostratigrafii. Druhá verze, tzv. předsoučtová časová migrace ZRA (zachování relativních amplitud) byla využita pro analýzu seismických atributů. Obě verze byly dodány ve standardním formátu SEG-Y. Datový blok pokrývá celé zájmové území lokality (obr. 3-1).

Obr. 3-4 Profil vrtu Br-65 – karotážní křivky SP a RAG2, sekvenčně stratigrafické systémové trakty (FSST, HST a TST), koreláty a upravená stratigrafie, přítoky ropy a plynu, místa odběrů horninových jader a jejich kvalita. Detail badenu je na obr. 3-5. Písečné obzory úložného komplexu L1, L2, L3 a L4 jsou znázorněny vedle archívního označení badenských ložiskových obzorů 12-12a-13-14 (Bílek 1974).



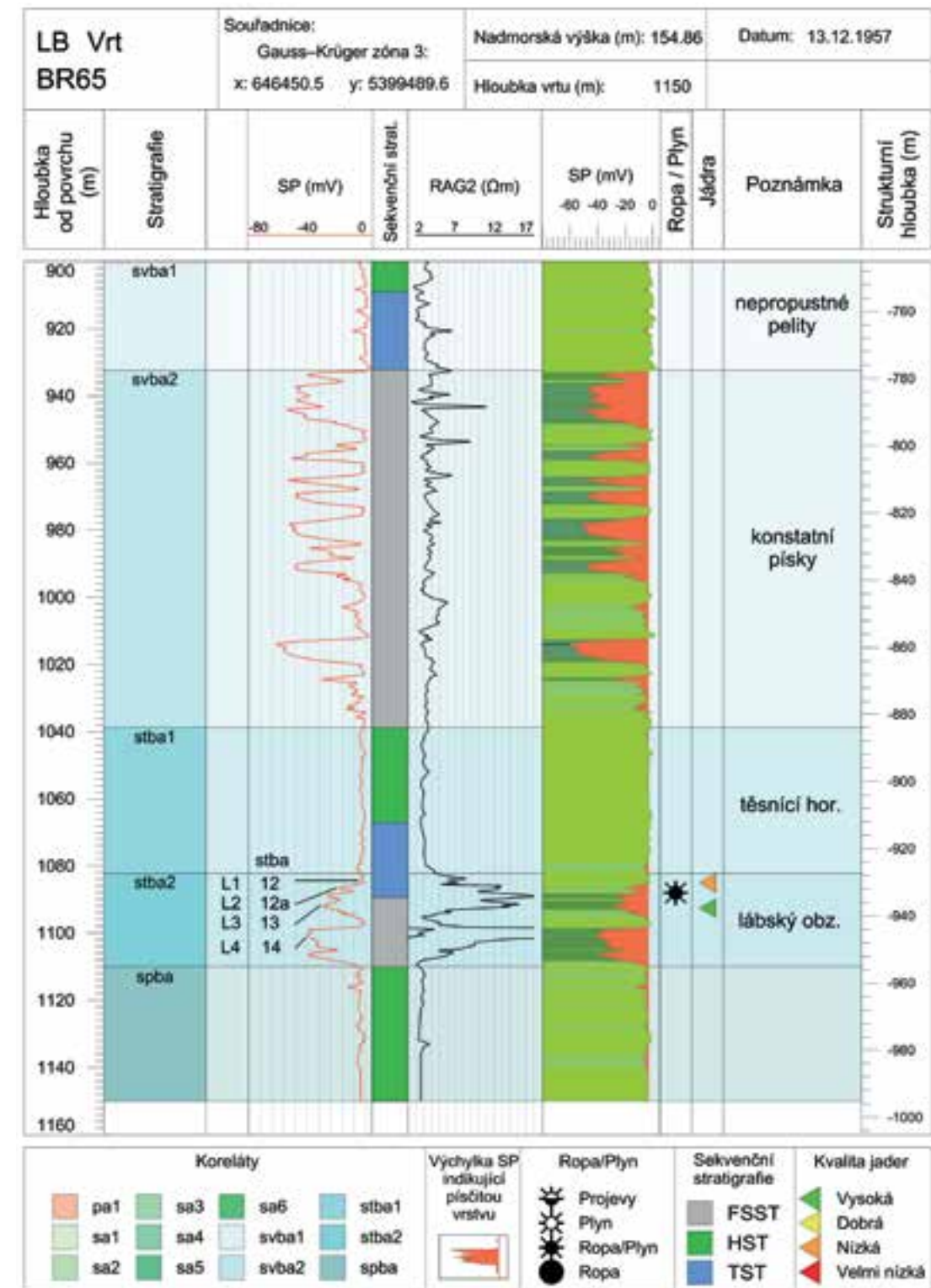
Pro uvedená tělesa jsou v modelu konstruovány mapy petrofyzikálních vlastností.

Sít zpracovaných korelačních schémat je uvedena

na obr. 3-3 a příklady korelace karotážních měření mezi jednotlivými vrty podél profilu 1 je na obr. 3-6 a profilu 2 na obr. 3-7 a 3-8.¹

¹ Na základě starší stratigrafie používané v rámci Vídeňské pánve do sedmdesátých let minulého století byly pískovce lábského obzoru řazeny do svrchního tortonu, resp. badenu. V archívních pracích byl obzor také členěn do jednotlivých písků s označením 12, 12a, 13, a 14. svrchnobadenský obzor (případně jen badenský obzor). V současnosti se lábský obzor z hlediska věku řadí do středního badenu. Koreláty L1, L2, L3 a L4 jsou víceméně shodné s povrchy označovány v minulosti jako 12, 12a, 13, a 14. svrchnobadenský obzor (obr. 3-4).

Obr. 3-5 Profil vrtu Br-65 – karotážní křivky SP a RAG2, detail badenu, ostatní vysvětlivky viz obr. 3-4.

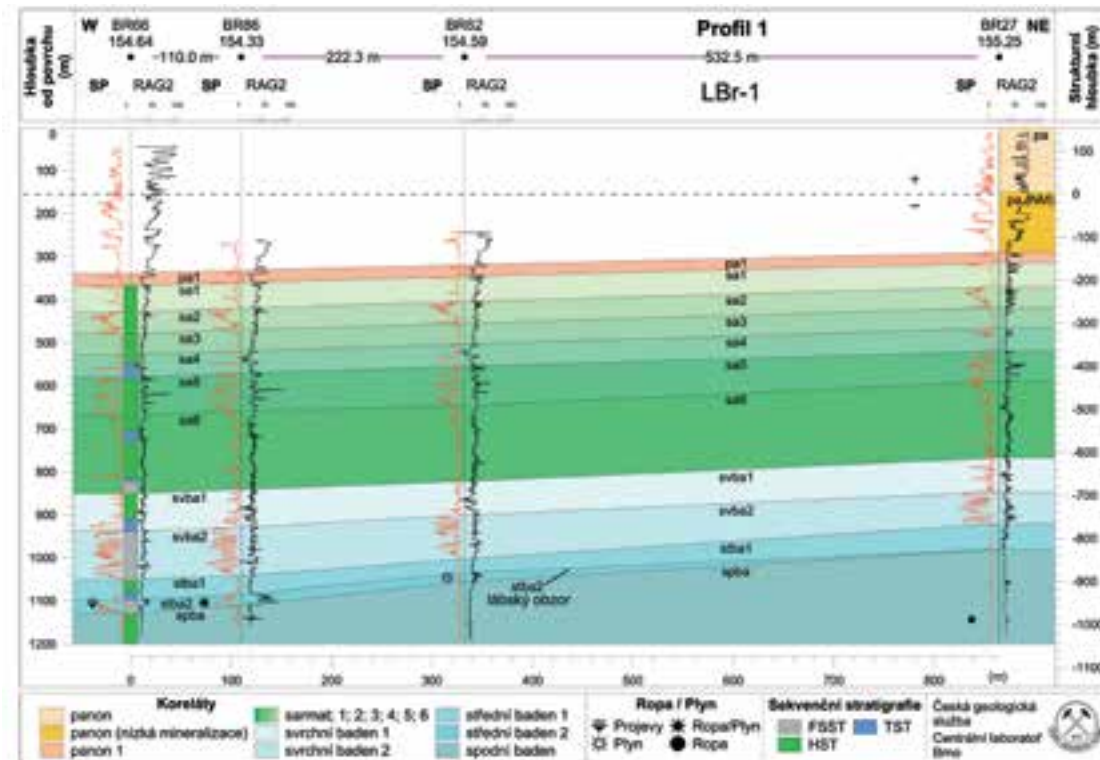


3.5 Interpretace karotážních křivek z hlediska sekvenční stratigrafie

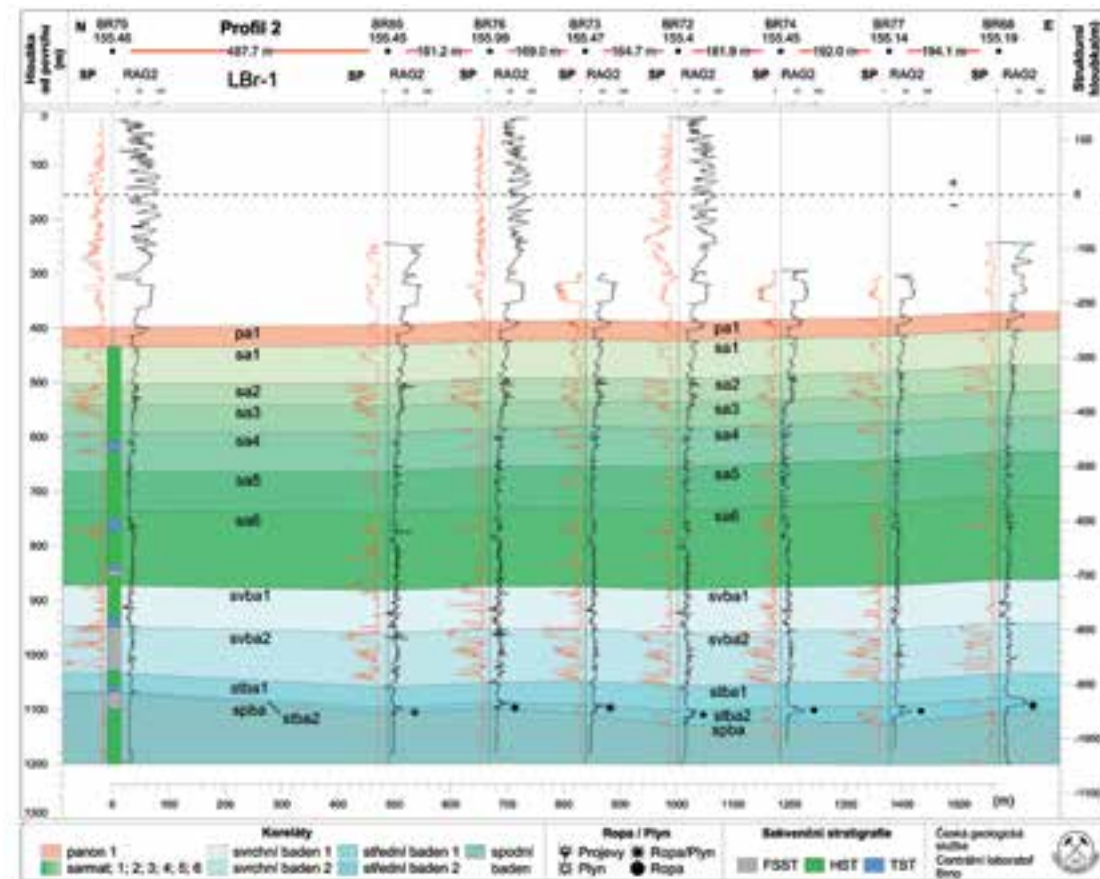
V rámci sekvenčněstratigrafické analýzy (viz kap. 2.4 a projektový výstup V1.9) vyčlenil Nehyba (2015) v sedimentech badenu tři systémové trakty, které tvoří jednu depoziční sekvenci 3. řádu:

- FSST (trakt padající hladiny, „falling-stage system tract“) na bázi středního badenu (spadá sem obzor lábských písků),
- TST (transgresivní trakt, „transgressive system tract“) projevující se ztenčováním písčitého tělesa (obzory L2-L3),

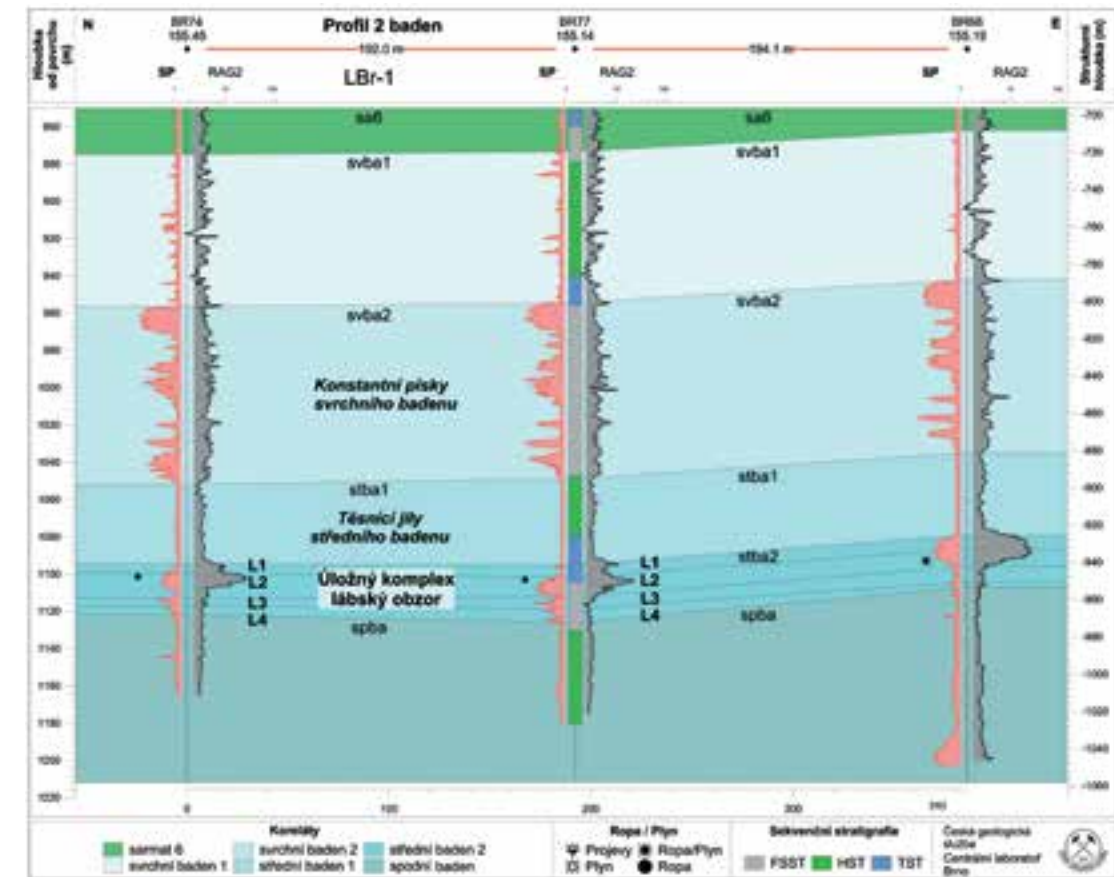
Obr. 3-6 Korelační schéma karotážních měření ve vrtech Br-66-86-62-27 ve střední části ložiska LBr-1 (viz mapa na obr. 3-3).



Obr. 3-7 Korelace karotážních diagramů vrtů Br-75-85-76-73-72-74-77 v severní části ložiska LBr-1. Detail středního a svrchního badenu (modrý rám) ve vrtech Br-74-77-68 je na obr. 3-8.



Obr. 3-8 Detail korelace karotážních diagramů svrchního a středního badenu na vrtech Br-74-77-68 v severní části úložného komplexu LBr-1. Výrazné výchylky křivek RAG2 doprava (šedé-černé) indikují syčení kolektorů L1 a L2 ropou a plynem.



- HST (trakt vysoké hladiny, „high-stand system tract“) se vzrůstajícím podílem jílovité složky sedimentů (obzor L1 a nadložní jíly středního badenu). Uvedené traktu byly začleněny do karotážních profilů jednotlivých vrtů; popsané členění bylo využito při sestavování 3D geologického modelu úložného komplexu. Příklady znázornění systémových traktů v karotážním profilu vrtu Br-65 jsou uvedeny na obr. 3-4 a 3-5.

3.6 Interpretace petrofyzikálních vlastností na základě elektrokarotážních měření

Na jednotlivých vrtech byly vyčleněny intervaly karotážních měření pro kvantitativní analýzu petrofyzikálních parametrů úložného komplexu lábského obzoru. Analýza vychází z datového souboru karotážních měření. V jednotlivých intervalech byly z naměřených hodnot spontánní polarizace (SP), zdánlivého měrného odporu (RAG 2,12) a dalších parametrů (odpor vrstevních vod, odpor jílu, cementační faktor, teplota apod.) vypočteny porozita a jílovitost (viz výstup V1.12). Interval středního badenu se ve své svrchní části vyznačuje souvislou, nepropustnou, více než 50 m mocnou polohou jílu (těsnící vrstva budoucího úložiště). Pod tímto jílovitým těsnícím intervalem se vyskytuje v ložiskové oblasti LBr-1 střídání propustnějších písčitéch poloh, místy syčených uhlovodíky, s nepropustnými těsnícími proplásky, tj. potenci-

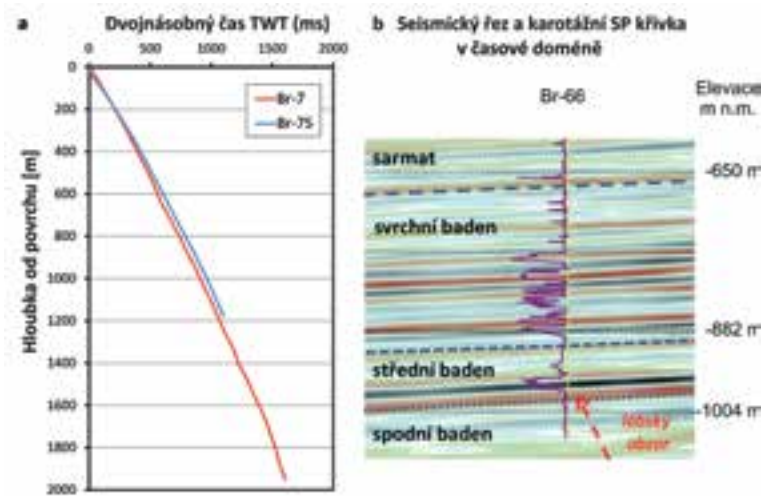
ální úložný komplex lábského obzoru. Podložní spodní baden je většinou jílovitý a nepropustný. Z hodnot porozity vypočtených na základě karotážních měření pro jednotlivé vrstvy lábského obzoru byly zkonstruovány mapy, které byly začleněny do 3D modelu.

3.7 Integrace seismických a karotážních dat v časovém oboru

Na vlastním ložisku LBr-1 nebyla realizována žádná seismokarotážní měření. Na integraci seismických, vrtných a karotážních dat v časovém oboru, resp. na převod vrtných a karotážních dat z hloubkového do časového oboru byla použita seismokarotážní měření na vrtech z blízkého okolí ložiska LBr-1, která byla přiřazena vrtům Br-7 a Br-75. Závislost dvojnásobného času (TWT) na hloubce je znázorněna na obr. 3-9a. Příslušný převodní vztah byl ověřen pomocí shody karotážních křivek se seismickými reflexy (obr. 3-9b). Výrazné reflexy na obr. 3-9b odpovídají lábskému obzoru a bazálnímu komplexu svrchnobadenských písků.

3.8 Mapování reflexních rozhraní seismických horizontů

Spojovací linie při korelaci na seismických profilech jsou vedeny, pokud je to možné, podél souvislých reflexů,



Obr. 3-9 (a) Závislost dvojnásobného času TWT na hloubce, (b) integrace karotážních záznamů a seismiky.

kteří charakterizují litologické (případně stratigrafické) rozhraní mezi písčivými a jílovitými vrstvami. Relativně kvalitní geologickou interpretací seismických profilů je možné udělat do dvojnásobného času cca 1,7 sekundy, tj. do hloubky přibližně 2 000 m. Obraz vlnového pole na časech vyšších než 1,7 sekundy je poměrně složitý a přiřazení geologických jevů jednotlivým reflexům je sporné, protože do této hloubky ve sledované oblasti nezasahuje žádný vrt.

Při transformaci mapovaných reflexních rozhraní z časového oboru (časových map) do hloubkového oboru (strukturních map) se postupovalo tak, že hodnoty hloubky daného horizontu odečtené z karotážních profilů vrtů byly přiřazeny příslušnému reflexnímu rozhraní.

Tímto způsobem byla ověřena konverze z času do hloubek pomocí vrtných údajů (obr. 3-9, 3-11 a 3-12), čímž bylo dosaženo vyšší přesnosti a snížení disproporcí než v případě použití seismokarotáže samotné. Na základě 3D seismického obrazu provázaného s karotáží byly sestaveny 3 mapy v časové a 6 map v hloubkové doméně:

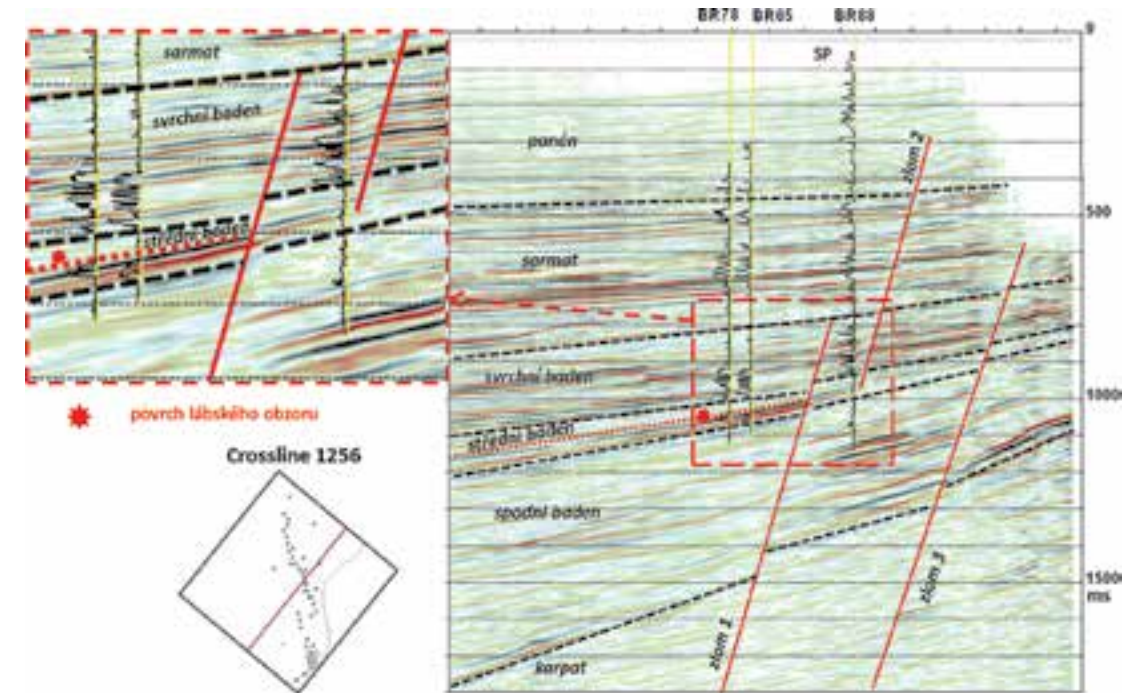
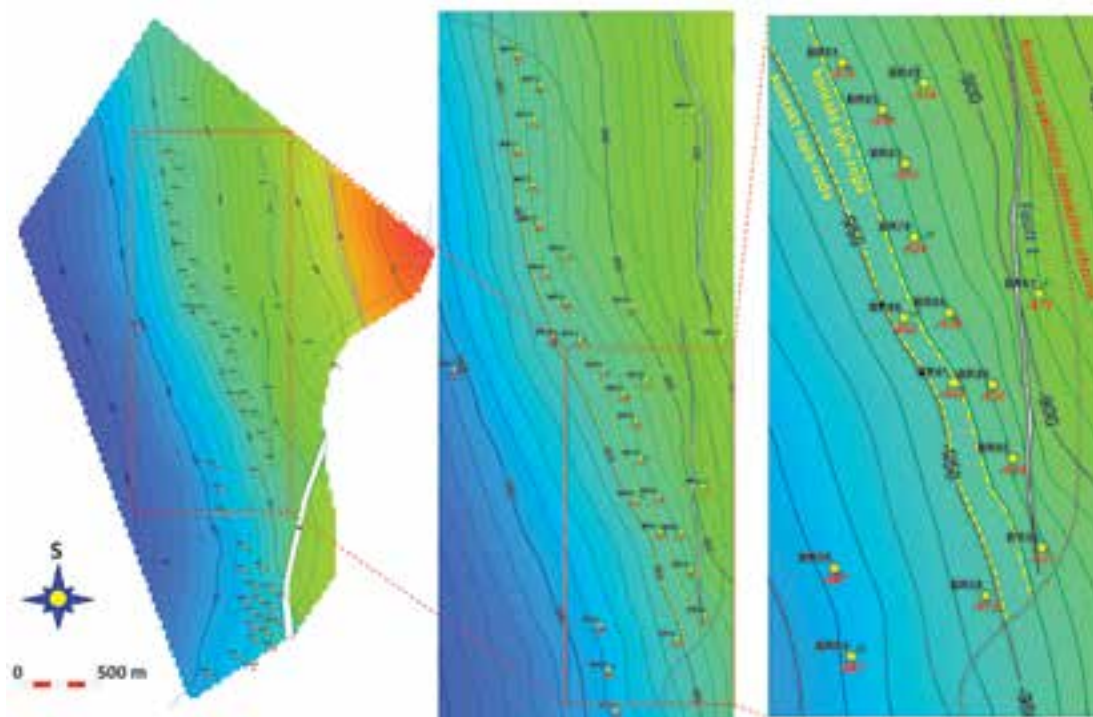
- mapa povrchu středního badenu (stba), tj. těsnicího horizontu úložného komplexu, v časové a hloubkové doméně,
- mapa povrchu lábského obzoru (L1) v časové a hloubkové doméně (obr. 3-10),
- mapy povrchu dílčích vrstev lábského obzoru (koreláty L2, L3 a L4) v hloubkové doméně,
- mapa povrchu sedimentů spodního badenu (spba), který je současně bází sedimentů středního badenu, resp. lábského obzoru, tj. bází úložného komplexu.

Časové mapy vybraných povrchů dokumentují izolacie dvojnásobného času od srovnávací hladiny seismických měření +200 m, tj. čas 0,0 sekundy je na úrovni +200 m nad mořem. Hloubkové (tzv. strukturní) mapy jsou vztaženy k nulové nadmořské výšce. Na hloubkové mapě (obr. 3-10) je vidět, že povrch lábského obzoru (L1) relativně monotónně stoupá ve směru od západu na východ.

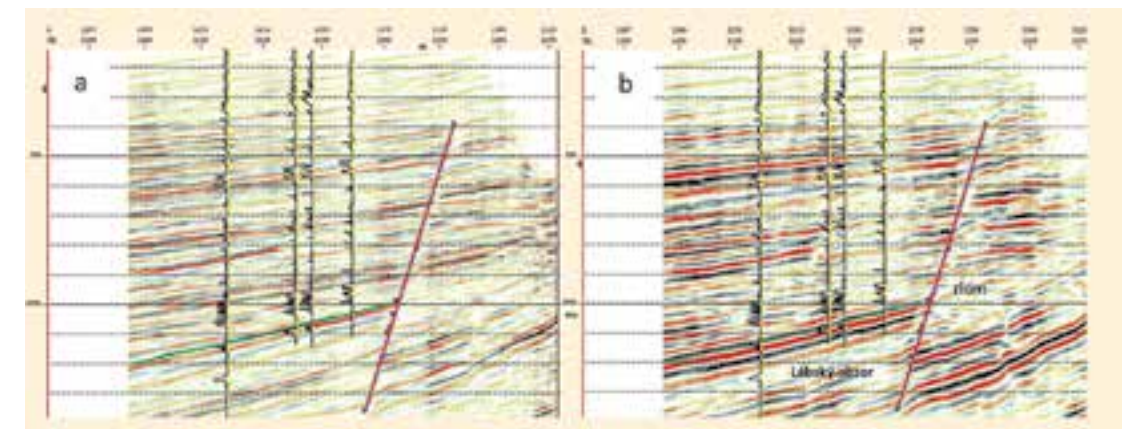
3.9 Analýza zlomů

Zájímavé území je porušeno systémem lokálních, několik set metrů dlouhých zlomů severojižního směru

Obr. 3-10 Strukturní hloubková mapa povrchu lábského obzoru L1: OWC – kontakt ropa/voda, GOC – kontakt plyn/ropa, izolacie jsou v metrech vztažených k nulové nadmořské výšce.



Obr. 3-11 Seismický řez s korelačním schématem vrtů v jižní části ložiska LBr-1 v časové doméně s identifikovanými rozhraními základních stratigrafických jednotek a drobnějšími zlomy.

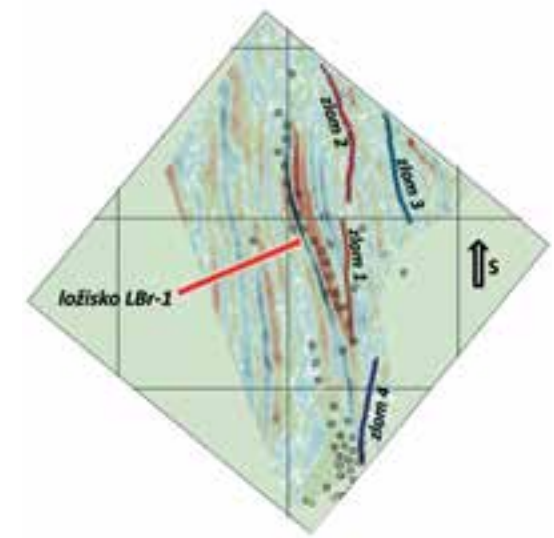


Obr. 3-12 Projev zlomů v seismických řezech s různým způsobem zpracování: a – klasická předsumární časová migrace, b – nízkofrekvenční pásmový filtr 4-8-16-32 Hz.

s úklonem k východu a malou výškou skoku (do 20 m). Průběh zlomů v seismickém obrazu indikuje náhlé přerušování a změna úklonu reflexů (obr. 3-11). Zlomový systém se výrazně projevuje na seismických profilech, zejména při použití nízkofrekvenčního pásmového filtru (obr. 3-12).

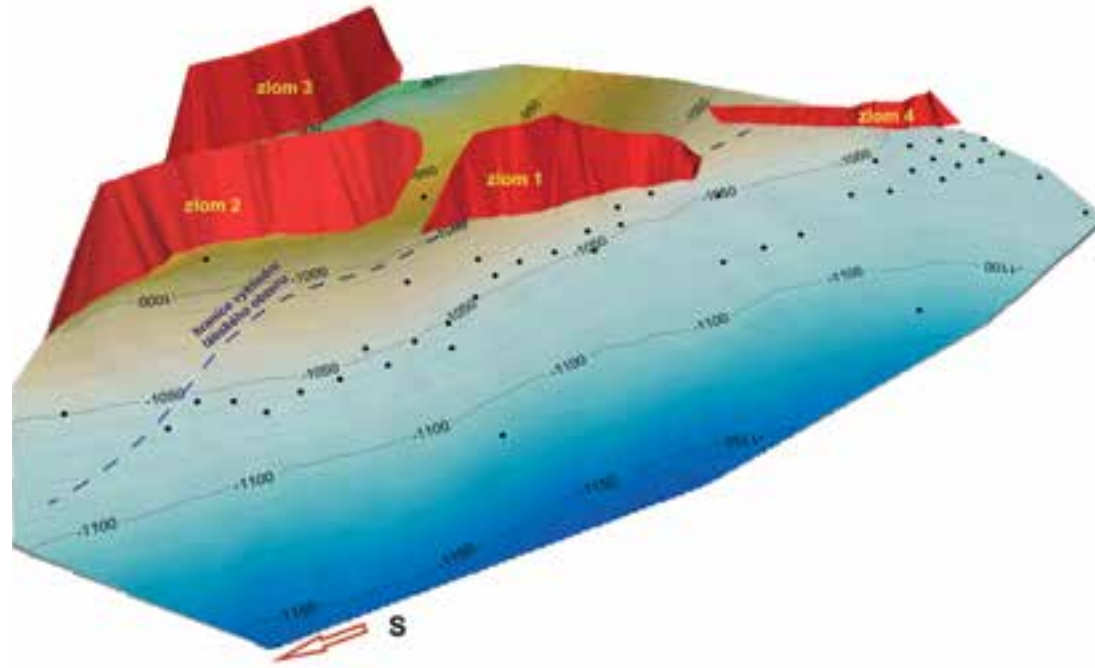
Mapování 3D průběhu zlomů je dokumentováno na obr. 3-13 a 3-14. Výška skoků zlomů (vzájemný vertikální posun ker) je na zlomech 1, 2 a 3 do 20 m. Přesto se projevují na seismickém obrazu vcelku zřetelně. Hlavní brodský zlom (4) v jižní části ložiska má směr severoseverovýchod-jihovýchod s úklonem k západoseverozápadu. Je částečně zachycen jen okrajem 3D seismiky. S výškou skoku přesahující 100 m má však větší regionální význam než zlomy 1, 2 a 3.

Zlomy 2 a 3 v oblasti ložiska LBr-1 jsou situovány mimo rozšíření písčitého vývoje lábského obzoru a pro simulaci ložiska nemají žádný význam. Zlom 1 částečně zasahuje do ložiska. Mocnost těsnicí vrstvy nad lábským



Obr. 3-13 Horizontální seismický řez zobrazující průběhy zlomů 1, 2, 3 a 4 přibližně na úrovni povrchu lábského obzoru. Brodský zlom (4) má skok cca 100 m, ostatní do 20 m.

Obr. 3-14 3D pohled na oblast ložiska LBr-1 – časová mapa v ms na úrovni povrchu lábského obzoru se zobrazením zlomových ploch („faults“). Hranice vyklínění písčitého lábského obzoru („pinchout boundary“) představuje litologické omezení ložiska; body reprezentují vrty.



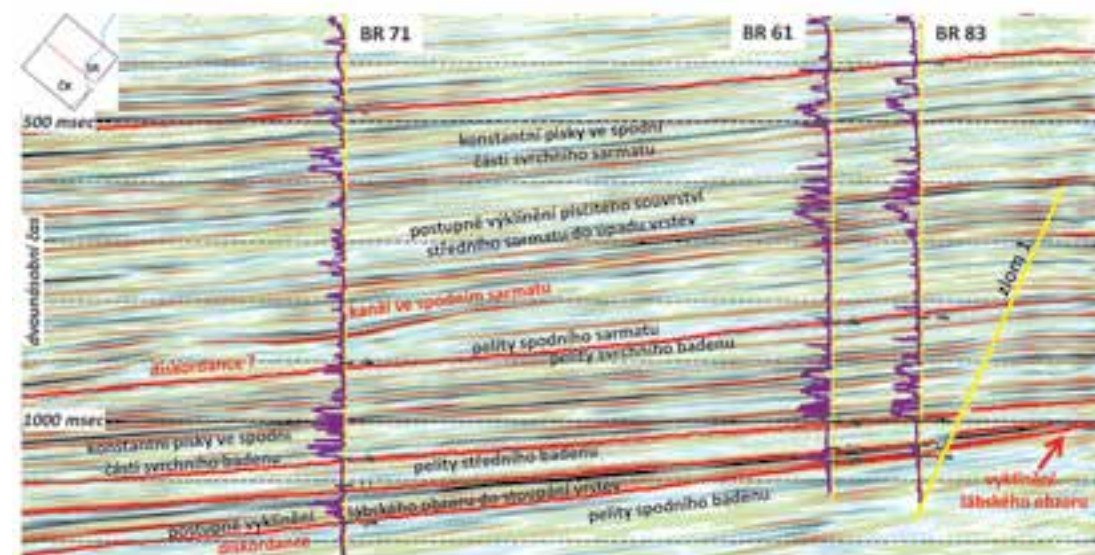
obzorem (jílovce středního badenu) je v oblasti celého ložiska 50-60 m. Podložní spodní baden je rovněž v petlickém vývoji a představuje spodní těsnicí element. Zlom 1 s výškou skoku 10–20 m nemá vliv na těsnost ložiska; může však částečně propojovat jednotlivé písčité polohy lábského obzoru (L1, L2, L3 a L4).

3.10 Litofaciální vrstevní model

Ve 3D seismickém obrazu bylo identifikováno několik sedimentologických jevů, které umožňují podrobnější interpretaci proměnlivosti a prostorového vymezení sedimentačního prostředí v geologickém čase a současné hloubce (obr. 3-15). Patří sem (zdola nahoru):

- diskordance na rozhraní spodního a středního badenu,
- vyklínění lábského písčitého tělesa středního badenu (ložiska) od západu k východu,
- pelity středního badenu uložené v hlubším mořském prostředí (těsnicí horizont úložního komplexu),
- konstantní písky ve spodní části svrchního badenu,
- pelity svrchního badenu indikující prohloubení moře,
- diskordance na rozhraní baden – sarmat v důsledku výzdvihu a částečné eroze,
- zahloubení říčního nebo podmořského proudového kanálu a jeho vyplnění mladšími sedimenty ve spodním sarmatu (obr. 3-15, BR71),
- postupné vyklínění písčitého souvrství od východu

Obr. 3-15 Seismický řez (inline 1223) v časové doméně: sedimentologické fenomény vývoje depozičního prostředí badenu a sarmatu v oblasti LBr-1.



k západu ve středním sarmatu, tj. v opačném směru ve srovnání se středním badenem,
– konstantní písky ve spodní části svrchního sarmatu.

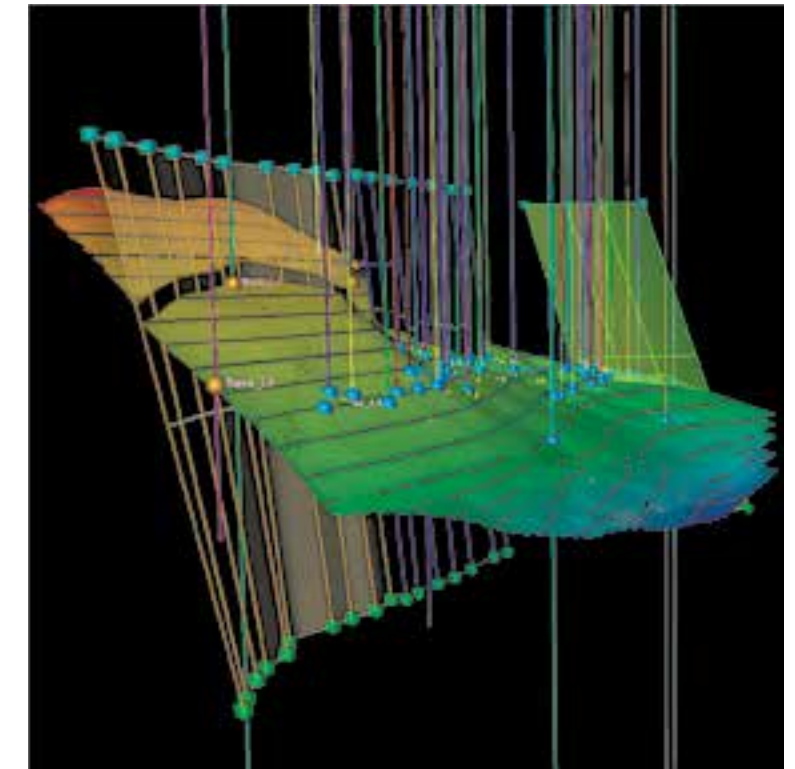
Na severním okraji ložiska LBr-1 vytváří lábský obzor litologickou past uhlovodíků, bariérou je zóna vyklínění písčivých těles („pinchout“, obr. 3-14 a 3-15), dále na východ jsou písky vystřídány nepropustnými jíly. Naopak, v jižní části ložiska má zlom 4 výšku skoku více než 100 m a je těsnicí bariérou pro dílčí písky lábského obzoru (L1, L2, L3 a L4). Tyto jsou navzájem vertikálně odděleny vložkami jílu mocnými cca 10 m. V jižní části ložiska je několik pastí kombinovaného typu, tj. těsnění vytváří zlomové plochy v kombinaci s hranicí vyklínění jednotlivých písků lábského obzoru.

Výše uvedená data jsou součástí 3D vrstevního modelu úložního komplexu s vybranými povrchy a zlomy (obr. 3-16 až 3-18) sestaveného v programovém prostředí Petrel firmy Schlumberger. Z rozdílu hodnot strukturálních map byly získány mapy celkových mocností. Každému dílčímu tělesu ohraničenému dvěma povrchy byly přiřazeny litologické charakteristiky a petrofyzikální vlastnosti (obr. 3-18).

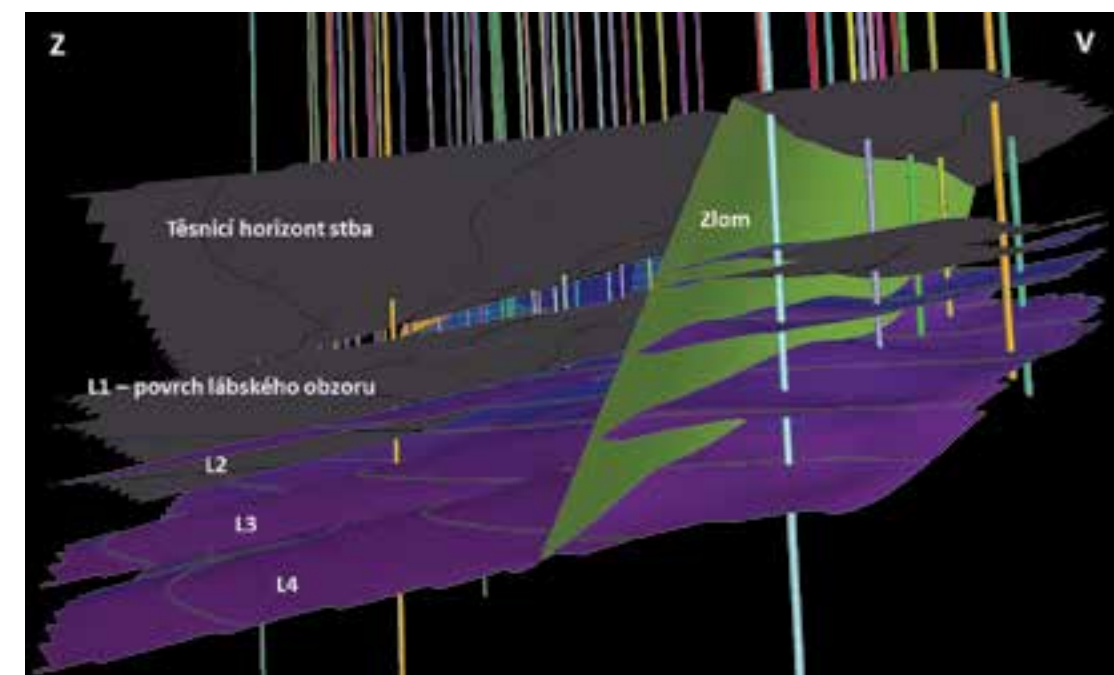
3.11 Model porozity a permeability

Výchozími daty pro konstrukci map pórovitosti byla data z výstupu V1.12 „Datový soubor nově vypočtených karotážních dat“, zpracovaného v rámci Aktivita 1. Vzhledem k tomu, že v rámci výstupu V1.12 nebylo možno z karotážních záznamů kvantitativně vyhodnotit propustnost písků (byla hodnocena jenom kvalitativně – propustné nebo nepropustné), a že nebyly k dispozici žádné výsledky laboratorních měření

na vzorcích z vrtných jader z rezervoárového horizontu na LBr-1, bylo nutné pro výpočet propustnosti využít analogii s ropo-plynovými ložisky lábského obzoru z jiných oblastí Vídeňské pánve (archív ČGS). Závislost propustnosti na pórovitosti nejlépe vystihuje mocninná regresní funkce (obr. 3-19), při korelačním koeficientu 0,8005. S využitím této závislosti byly vypočteny hodnoty propustnosti pro jednotlivé intervaly a ná-

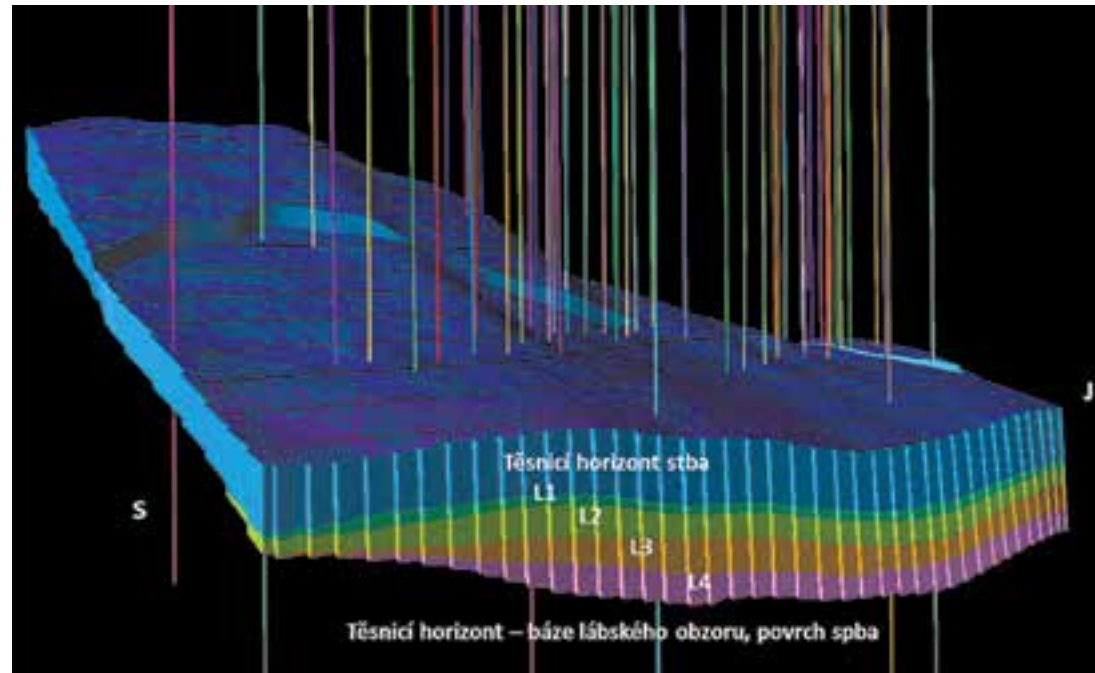


Obr. 3-16 3D Model povrchů dílčích vrstev lábského obzoru (L1 až L4) se zlomy v prostředí Petrel (pohled od severu).

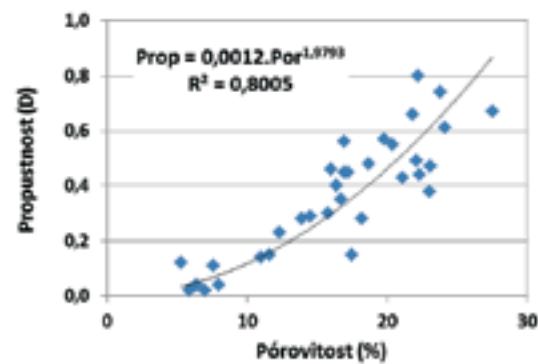


Obr. 3-17 3D Model povrchů těsnicí vrstvy, dílčích kolektorů L1-L4 a báze lábského obzoru (pohled od J). Zeleně – plocha zlomu protínající povrchy. Barevné linie zobrazují vrty.

Obr. 3-18 3D model lábského obzoru a nadložního těsnícího horizontu se zlomy (pohled od SZ). Vertikální stavba a litologická výplň je viditelná vpředu na severojižním řezu: Modře jsou znázorněny nepropustné vrstvy těsnícího horizontu; ostatní barvy reprezentují dílčí vrstvy lábského obzoru.



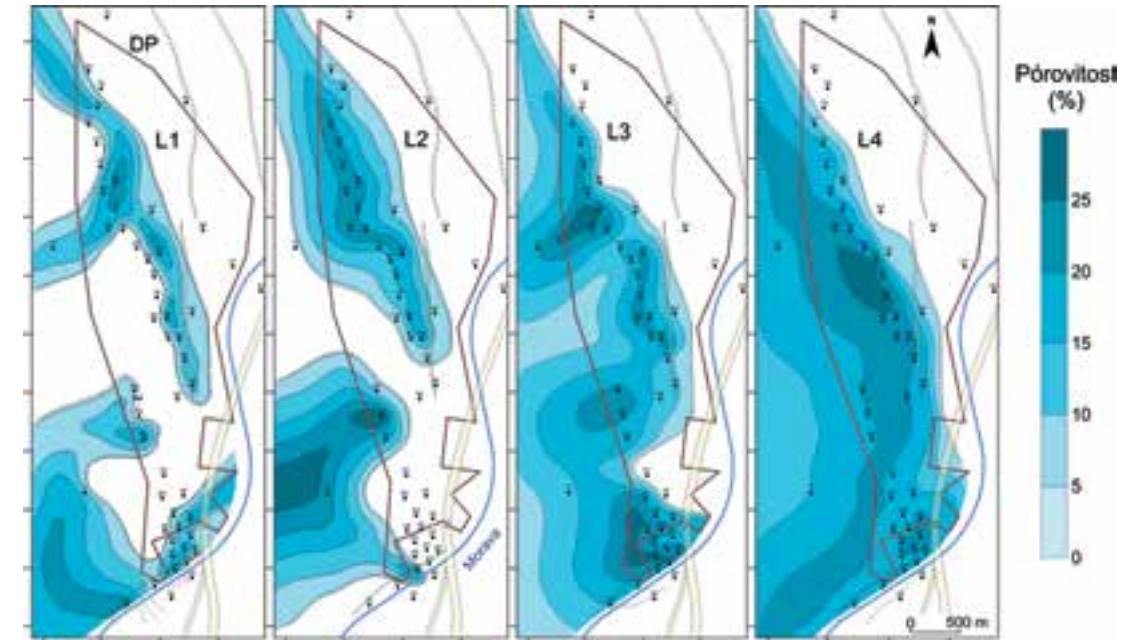
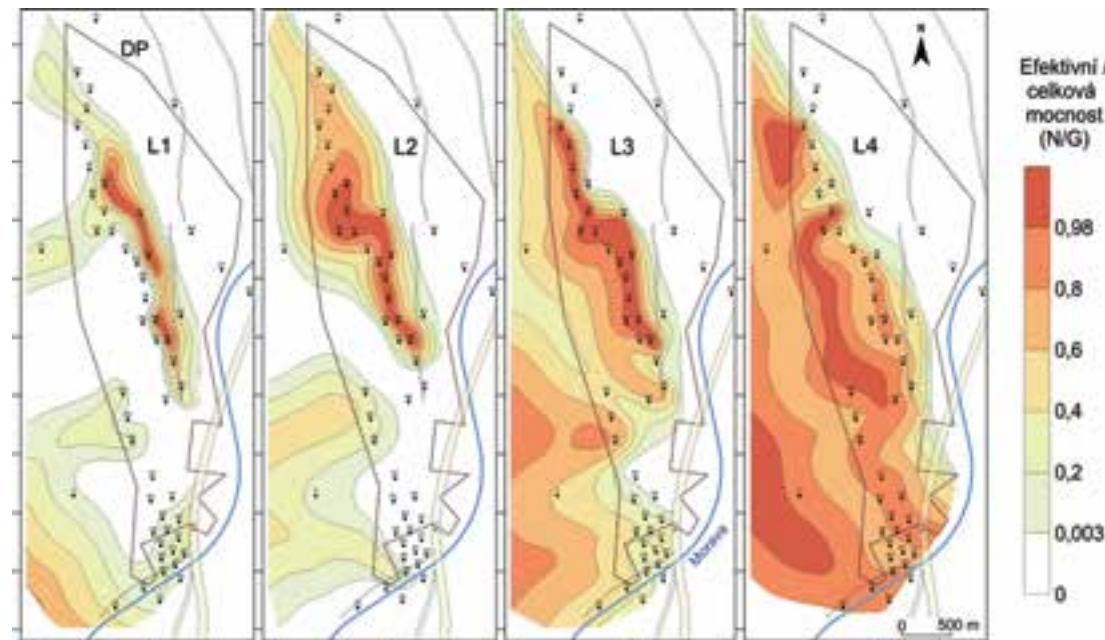
Obr. 3-19 Závislost propustnosti hornin (Prop) lábského horizontu v severní části Vídeňské pánve na jejich pórovitosti (Por).



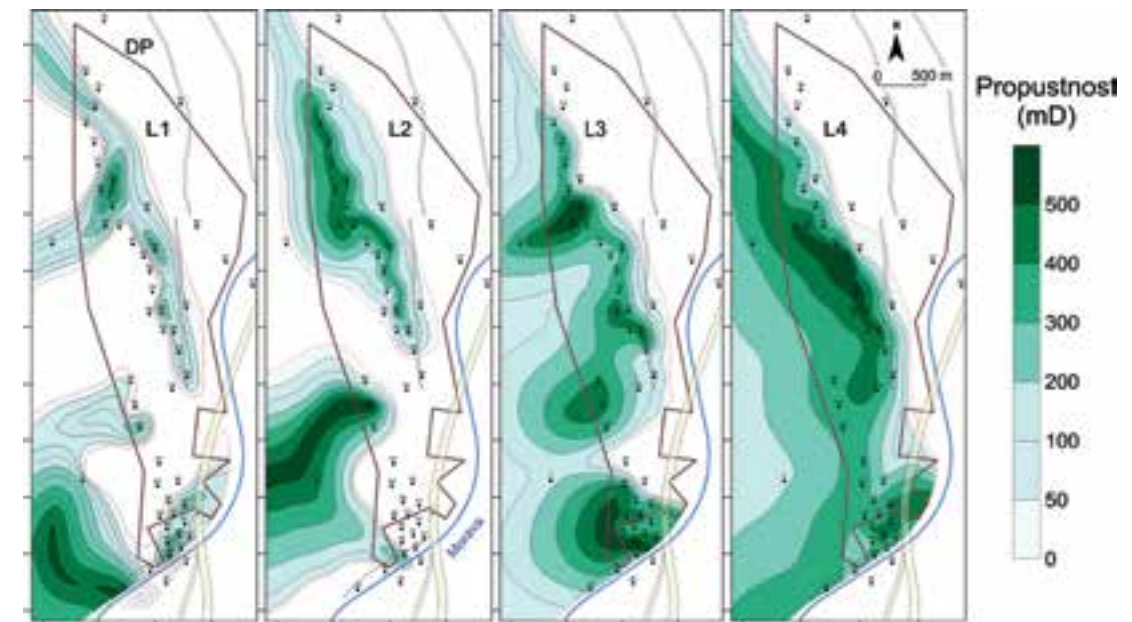
sledně konstruovány mapy propustnosti. Současné byly sestaveny v rámci výstupu V2.4 „Mapy poměru efektivní a celkové mocnosti (net/gross) vybraných horizontů“.

Dílčím tělesům lábského obzoru (L1, L2, L3 a L4) byly přiřazeny vypočtené hodnoty poměru efektivní mocnosti vůči celkové mocnosti („net-to-gross“) a hodnoty pórovitosti, na základě kterých byly zkonstruovány mapy izolinií pro jednotlivá tělesa (obr. 3-20 a 3-21). Identický postup byl použit při konstrukci map propustnosti (obr. 3-22 a 3-23) odvozené z hodnot pórovitosti.

Obr. 3-20 Mapa poměru efektivní vůči celkové mocnosti („net-to-gross“) dílčích kolektorů (L1-L2-L3-L4) lábského obzoru úložného komplexu. Polygon DP znázorňuje obrys dobývacího prostoru Lanžhot I.



Obr. 3-21 Mapa pórovitosti („porosity“) dílčích kolektorů (L1-L2-L3-L4) lábského obzoru úložného komplexu.



Obr. 3-22 Model dílčích kolektorů L1, L2, L3 a L4 s izoliniemi propustnosti.

3.12 Mapy původních a současných kontaktů jednotlivých fluid v ložiskových obzorech

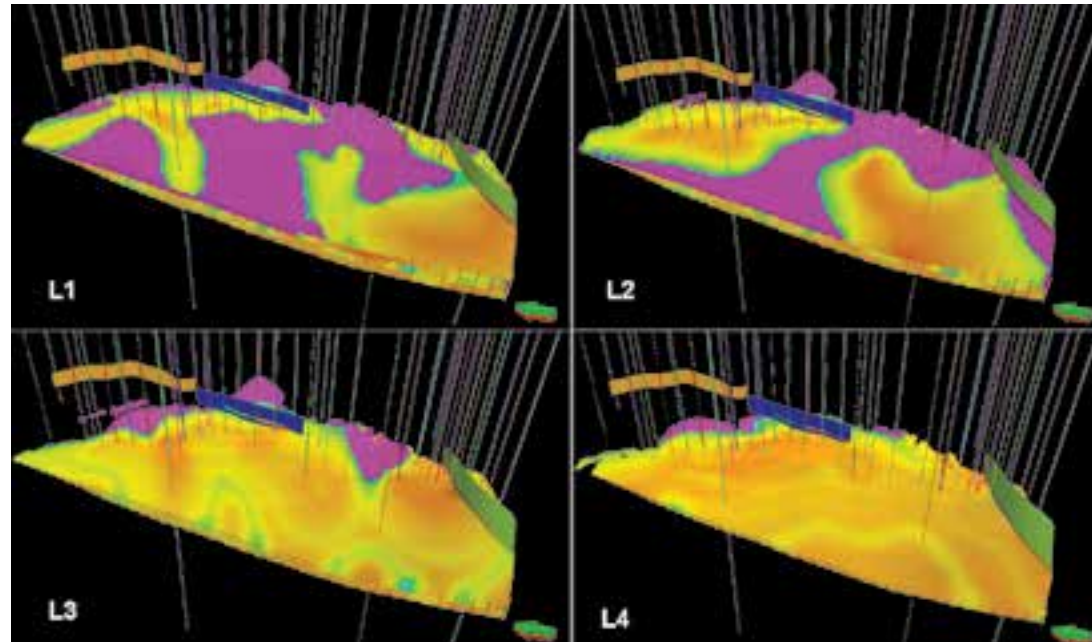
Výchozími daty pro určení původních kontaktů jednotlivých fluid v ložiskových obzorech byla archivní data z počátečního průzkumného období, tj. výsledky čerpacích zkoušek a informace o počátečním průběhu těžby na jednotlivých sondách. Dalším zdrojem dat byly výpočty zásob (Šelle et al. 1960, Káňa 1998). Současné kontakty jednotlivých médií byly určeny na základě údajů o zavodnění sond po ukončení těžby.

Na ložisku LBr-1 bylo v letech 1957 – 1960 odvrtno celkem 30 vrtů (obr. 2-6). Těžební otvorkou 24 vrtů při

vzájemné vzdálenosti cca 200 m bylo vymezeno ložisko s úzkým ropným pásmem a poměrně rozsáhlou plynovou čepicí. Omezení plynonosti linií vyslínění bylo stanoveno na základě výsledků negativních vrtů Br-27, Br-88, Br-54, Br-75 a potvrzeno i v projektu REPP-CO2 analýzou atributů nově realizovaných 3D seismických měření. Vodní zápolí ložiska bylo potvrzeno výsledky vrtů Br-58, Br-66, Br-69 a Br-71. Efektivní mocnost roponosné části nepřesahuje 8 m a u plynonosné části je maximálně 7,5 m.

Strukturální linie kontaktu voda-ropa byla před zahájením těžby kladena do hloubky –953 až –948 m n.m. Kontakt ropa-plyn byl kladen do strukturální hloubky –943 m.

Obr. 3-23 3D Model propustnosti dílčích písčítých těles L1, L2, L3 a L4 lábského obzoru se zlomy a vrty.

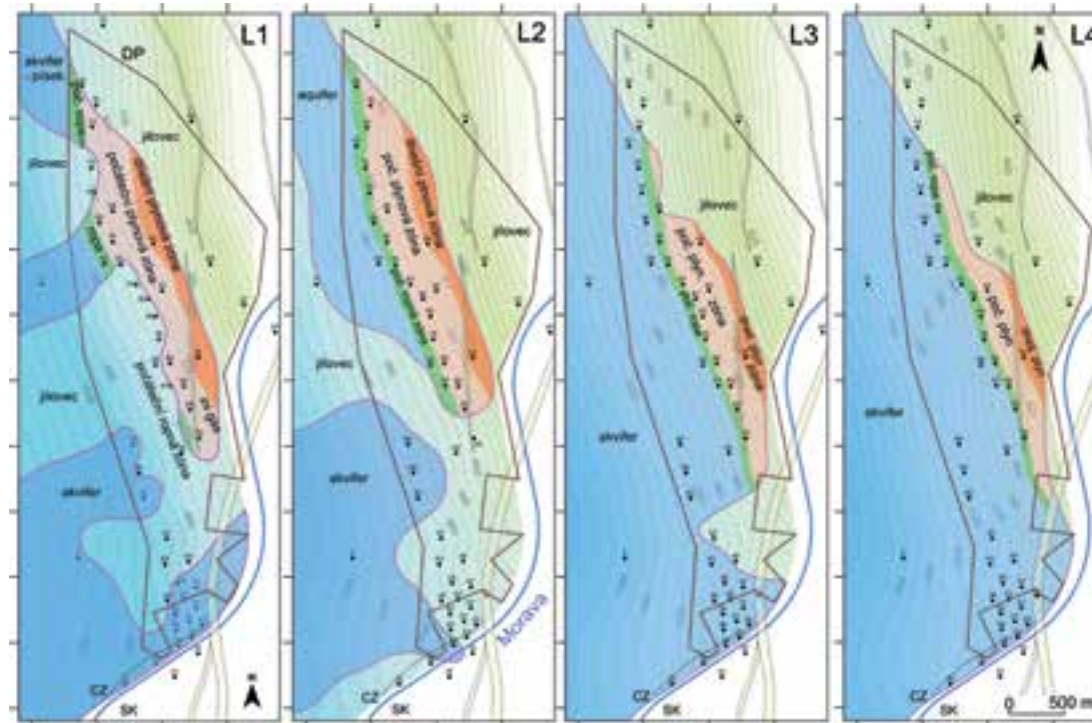


Nejistota při stanovení kontaktu ropa-voda byla dána litologickou proměnlivostí jednotlivých poloh písků, složitým systémem vertikálního propojení a také skutečností, že v průběhu hloubení vrtů již částečně probíhala těžba, která mohla mít vliv na pohyb kontaktu.

Provedená analýza víceméně ukazuje, že všechny píský ložiska LBr-1 měly jednotný původní kontakt ropa-voda na úrovni cca -953 m a kontakt ropa-plyn na úrovni -943 m.

Poněkud složitější je stanovení současných kontaktů. V průběhu těžby se sondy postupně zavodňovaly; vodní zápolí ložiska je navíc silně aktivní, což při složitém vertikálním propojení jednotlivých poloh písků a laterální litologické proměnlivosti značně komplikuje pohyb kontaktů jednotlivých médií. Problematiké je také stanovení skutečně odtěženého objemu plynu z plynové čepice. Je rovněž třeba vzít v úvahu, že po ukončení ekonomicky efektivní těžby zůstalo

Obr. 3-24 Strukturální mapy povrchů dílčích kolektorů (L1-L4) lábského obzoru s hranicemi vyklínění (fialová linie). Barevně jsou znázorněny zóny sycení plynem (červená), ropou (zelená, část je zakrytá zónou plynu). Vodní zápolí je modré. Dobývací prostor Lanžhot I je vyznačen polygonem DP.



v ložisku těžko odhadnutelné množství zbytkové ropy.

Po zohlednění dostupných poznatků byl předběžně stanoven v ložisku úzký lem ropy pod zbytkovou plynovou čepicí, tj. současný kontakt ropa-voda, resp. plyn-voda pravděpodobně s úzkou zónou ropy, se klade na strukturální linii cca -930 m. Vnější původní i současné kontakty jsou znázorněny na mapách povrchů písků lábského obzoru L1, L2, L3 a L4 (obr. 3-25).

3.12 Testování seismických atributů a zbytkové sycení uhlovodíky

Pro potřeby upřesnění zbytkového sycení ložiska byla použita analýza seismických atributů. Rozdíly vlastností horninového prostředí způsobují vizuálně pozorovatelné změny charakteru seismických reflexů, které bývají vyjádřené změnami amplitudy, fáze, frekvence a dalších vlastností seismického vlnového pole. Analýza geometrických, kinematických, dynamických a statistických vlastností seismického vlnového pole se označuje jako analýza seismických atributů. Seismické atributy jsou analyzovány na celých profilech, nebo plošně ze souboru seismických dat v tzv. „okně“ podél (pod nebo

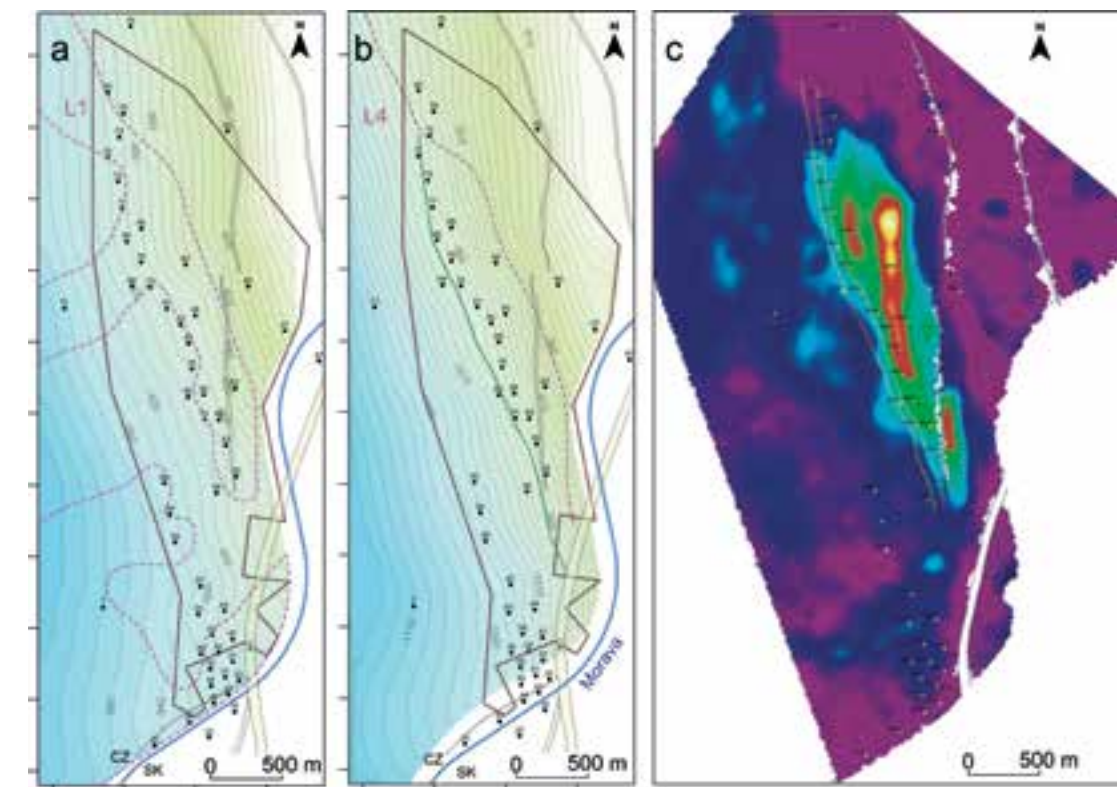
nad) interpretovaného horizontu. Výsledný atribut pak může být zobrazen např. pomocí barevné škály a interpretován.

V případě LBr-1 je plošná analýza seismických atributů provedena na lábském obzoru, jednom z nejvýraznějších fenoménů oblasti. Z množství atributů je vybrána průměrná absolutní amplituda („average absolute amplitude“, viz obr. 3-25 a 3-26), která zřetelně zobrazuje zbytkové nasycení uhlovodíky a původní rozsah ložiska.

3.13 Výpočet geologických zásob

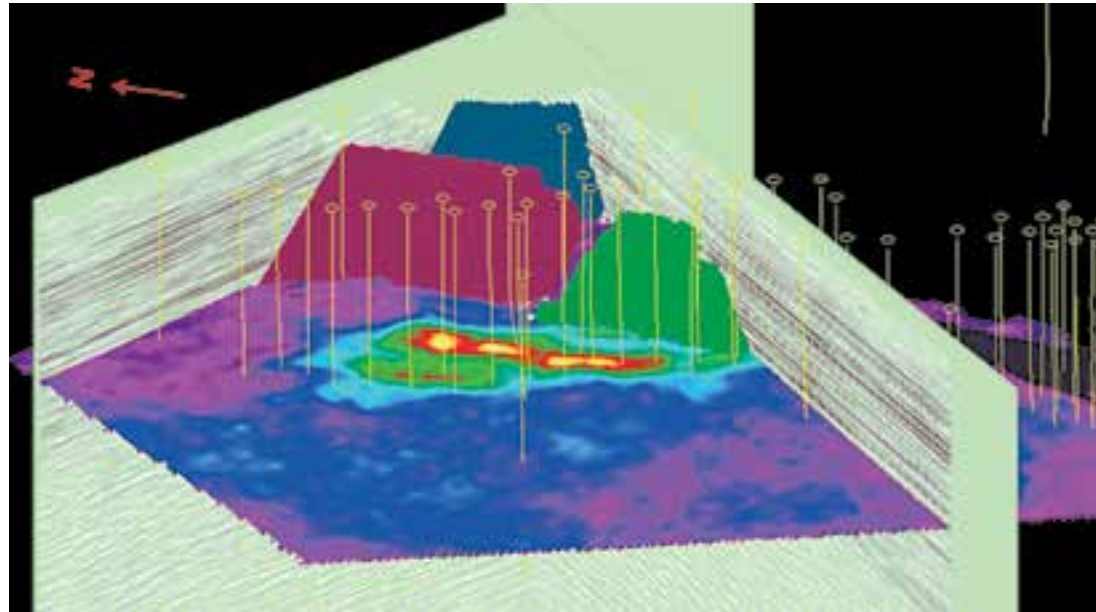
Kontrolou relevance sestaveného 3D modelu je nové provedení výpočtů zásob ropy a plynu a jejich srovnání s archivními výpočty zásob (Šelle et al. 1960) a také s celkovým vytěženým množstvím ropy a plynu na ložisku LBr-1 podle Káni (1998). Výsledky takového porovnání pro nový model ložiska LBr-1 jsou uvedeny v tab. 3-1.

Přijatelná shoda výpočtů objemů v novém 3D modelu s archivními daty (tab. 3-1) potvrzuje spolehlivost získaných výsledků a jejich použití jako vstupních dat v dynamickém modelování ukládání CO₂.



Obr. 3-25 (a) strukturální mapa povrchu středně badenského těsnícího horizontu v nadloží lábského obzoru: fialová přerušovaná čára – vyklínění písků L1; (b) strukturální mapa povrchu spodního badenu, tj. báze lábského obzoru: fialová čára – vyklínění písků L4. Ze čtyř drobných zlomů (silnější černé linie) jeden protíná ložisko, přitom nemá vliv na utěsnění ložiskového obzoru; (c) výsledek analýzy seismických atributů znázorňuje intenzitu sycení plynem (modrá, zelená, červená a žlutá plocha) ca 30 let po dotěžení ložiska.

Obr. 3-26 3D pohled na povrch lábského obzoru úložného komplexu LBr-1 se znázorněním seismických profilů „inline“ a „crossline“, vrtů, zlomů a zbytkového sycení uhlodíky na základě analýzy atributu „průměrná absolutní amplituda“.



Tab. 3-1. Srovnání výpočtů zásob uhlodíků na základě nového 3D modelu s archivním výpočtem (Šelle et al. 1960) a vytěženým množstvím ropy a plynu podle archivních dat (Káňa 1998).

Nový výpočet zásob na základě 3D modelu			
Geologické zásoby ropy	Geologické zásoby plynu	Vytěžitelné zásoby ropy	Vytěžitelné zásoby plynu
tis. m ³	mil. m ³	tis. m ³	mil. m ³
290	97	73	77,6
Archivní výpočet zásob (Šelle et al. 1960)			
305	84	61,1	75,4
Archivní výpočet zásob (Kobich et al. 1986)			
365	56	61,4	42,0
Kumulativní těžba ropy a plynu (Káňa 1998)			
		Kumulativní těžba ropy	Kumulativní těžba plynu
		tis. m ³	mil. m ³
		61,9	68,7

3.14 Historie těžby

Pro potřeby dynamického modelování ukládání CO₂ byla pro vybrané těžební vrty ve 3D modelu vytvořena databáze historie průměrné denní těžby ropy a plynu vypočítané pro měsíční intervaly od r. 1960 do r. 1965, v některých případech až do r. 1969. Příklady pro vrty Br-89 a Br-64 jsou zobrazeny na obr. 3-27 a 3-28.

Z obr. 3-27 vyplývá, že těžba plynu na sondě Br-89 probíhala pouze v úvodní fázi, kdy byla také nejvyšší těžba ropy (dále se těžba plynu neevolovala) a že od jara 1964 nastalo výrazné zavodňování sondy a významný pokles těžby ropy.

Tlak plynu v plynové čepici byl využit pro zvýšení efektivity těžby ropy v celém ložisku LBr-1 a dotěžení plynu z vrtů Br-62 a Br-64 (obr. 3-28) probíhalo až

po faktickém ukončení těžby ropy v ropné zóně přilehlé části ložiska. Příklad uvedený na obr. 3-28 je použitý jako kalibrace dynamického modelu („history matching“) v kapitole 4.

Důležitým vstupem pro dynamické modelování je historie ložiskových tlaků. Výchozími daty pro teplotní a tlakový model byly archivní údaje z teplotních a tlakových měření v průběhu realizace čerpacích zkoušek, protokoly čerpacích zkoušek na jednotlivých vrtech na úrovni lábského obzoru a také těžební karty jednotlivých sond.

V době počáteční těžby a následném provozování ložiska cca do roku 1976 se měření tlaku hlubinným manometrem prakticky neprovádělo a ani údaje přetlaků na ústí sond nejsou k dispozici v dostatečném

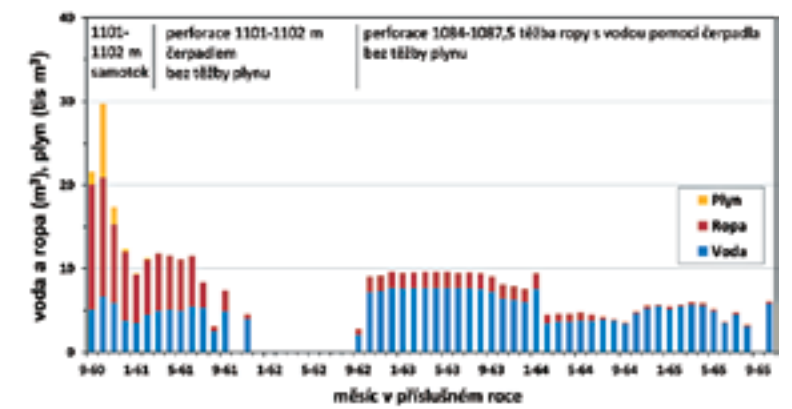
množství a dostatečné kvalitě. Vývoj ložiskového tlaku v průběhu těžební historie tak lze interpretovat pouze na základě počátečního nadhydrostatického tlaku (cca 124%), přepočteného na kontakt ropa-plyn. Pro všechny pisky lábského obzoru byla podle údajů z vrtu Br-62 stanovena hodnota na 12,5 MPa (v archivních zdrojích je však podle přepočtu počátečního tlaku na ústí sondy Br-64 uváděna také varianta počátečního ložiskového tlaku 11,76 MPa). Intenzivní těžbou v ropné zóně a následkem erupcí na sondách Br-62, resp. Br-64 došlo k poklesu ložiskového tlaku na hodnotu cca 9,83 MPa. Částečně to svědčí o složitém hydrostatickém propojení ropné zóny a plynové čepice. Po mnohaletém klidovém stavu v roce 1998 byl však podle sloupce hladin v sondách odhadnut regenerovaný ložiskový tlak na cca 9,96 MPa (mírně podhydrostatický, cca o 8%). V současné době podle odhadu ložiskový tlak přesahuje 10,0 MPa. Výše popsané poznatky svědčí o kombinovaném režimu ložiska, tj. o značně aktivním působení vodního zápolí s částečným vlivem plynové čepice. Vývoj ložiskového tlaku v průběhu těžební historie je dokumentován na obr. 3-29. Upřesnění průběhu tlaku je jedním z předmětů dynamického modelování ložiska (viz kap. 4).

3.15 Model geometrie nadloží potenciálního úložiště včetně koncepčního hydrogeologického modelu, vertikální zonalita chemizmu vod a teplotní model

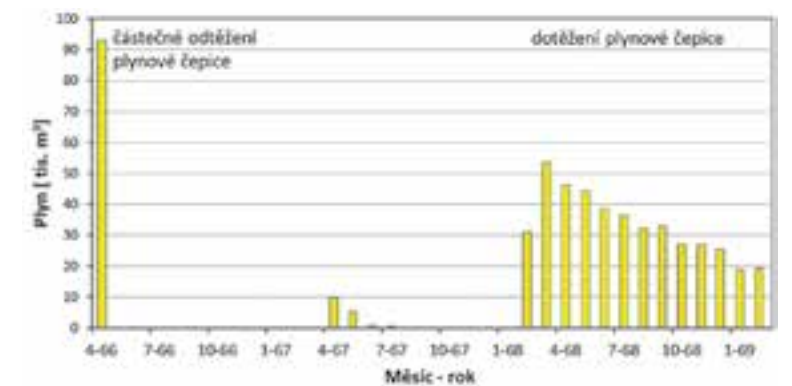
Zdrojovými daty pro model geometrie nadloží potenciálního úložiště na ložisku LBr-1 byly především karotážní diagramy jednotlivých vrtů, z kterých vyplývá, že potenciální úložný objekt (lábský obzor) je dobře utěsněn nadložními jílovcí středního badenu. K úniku tekutých nebo plyných médií může dojít jediné v důsledku technických příčin, tj. nedokonalým vystrojením sondy – špatnou cementací, nekvalitními likvidačními pracemi resp. v důsledku případných erupcí.

Nadložní písčité polohy ve svrchním badenu, sarmatu a spodním panonu jsou odděleny několikametrovými polohami jílovců, které zamezují vertikálnímu propojení pískovců, resp. vertikální komunikaci tekutých nebo plyných médií. Vrstvy jsou uloženy v oblasti ložiska LBr-1 více méně subhorizontálně, mírně stoupají cca severovýchodním směrem, kde jsou porušeny brodským zlomem s výškou skoku na úrovni lábského obzoru více než sto metrů. Brodský zlom v jižní části ložiska má funkci těsnicího elementu. Navíc lábský obzor východním směrem zcela vyklíňuje.

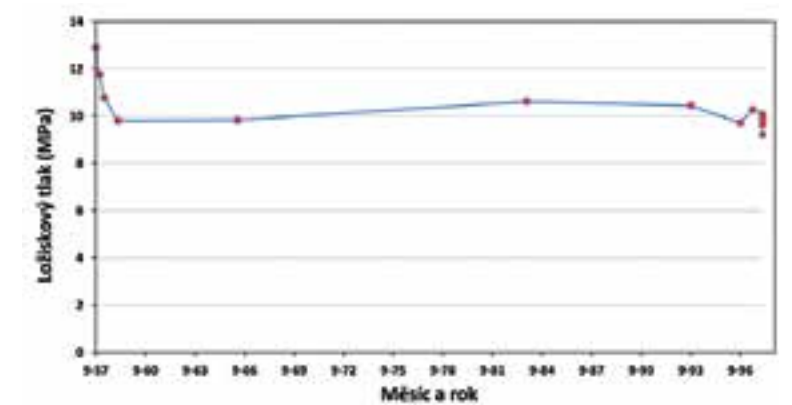
Vertikální zonalita chemizmu vod na ložisku LBr-1 vychází především z archivních laboratorních rozborů vrstevních vod odebraných při realizaci čerpacích zkoušek na jednotlivých vrtech. Důležitým krokem bylo také posouzení reprezentativnosti analýz. Při některých čer-



Obr. 3-27 Historie průměrné denní těžby plynu, ropy a vody v příslušném měsíci na vrtu Br-89 od září 1960 do června 1961 (těžba samotkem), následně do října 1965 s použitím čerpadla.



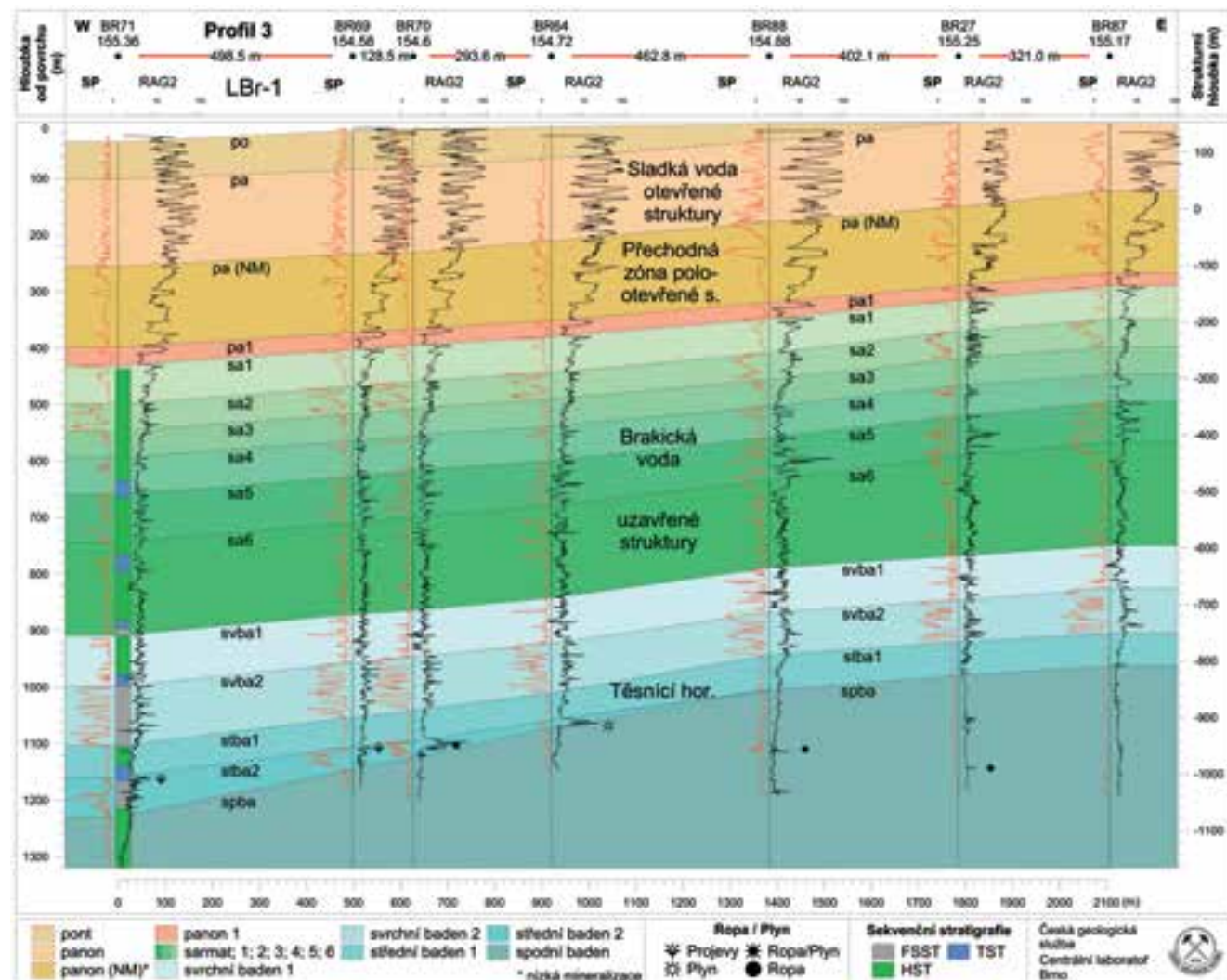
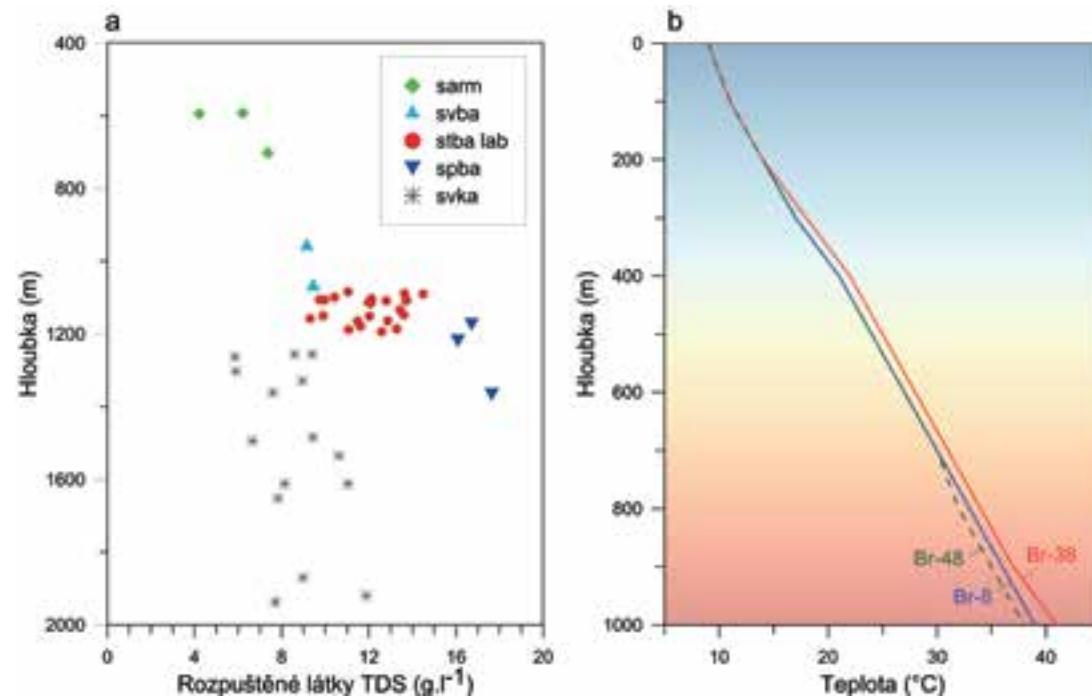
Obr. 3-28 Historie průměrné denní těžby plynu v příslušném měsíci z plynového vrtu Br-64 od dubna 1966 do února 1969.



Obr. 3-29 Vývoj ložiskových tlaků na LBr-1 podle archivních dat z vrtů Br-62 a Br-64.

pacích zkouškách nebyl totiž vytěžen dostatečný objem vody a jednalo se spíše o směs tzv. technologické kapaliny – víceméně sladké vody nebo solanky s vrstevní vodou. Takovéto případy byly vyloučeny z reprezentativního souboru dat. Výsledky analýzy vertikální zonality chemizmu vod jsou uvedeny na obr. 3-30a, kde je obsah celkových rozpuštěných látek (TDS, dříve mineralizace), zobrazen v závislosti na hloubce pro jednotlivé stratigrafické celky.

Obr. 3-30
(a) vertikální zonalita chemizmu vod vyjádřena obsahem rozpuštěných látek (TDS ~ dříve celková mineralizace) na ložisku LBr-1 a v blízkém okolí v neogenních sedimentech vídeňské pánve: sarm – sarmat, svba – svrchní baden, stba lab – střední baden lábský obzor, spba – spodní baden, svka – svrchní karpát; (b) ustálená teplota (°C) v závislosti na hloubce (m) ve vrtech Br-8, Br-38 a Br-48.



Pro vytvoření teplotního modelu nebyly k dispozici teplotní údaje přímo z ložiska LBr-1, byla proto využita měření ustálených teplot z jižní části ložiska Brodské na sondách Br-8, Br-38 a Br-48, na jejichž základě byly odvozeny teploty na úrovni lábského obzoru v ložisku LBr-1 v intervalu cca 41 – 43°C (obr. 3-30b).

Z koncepčního hydrogeologického modelu úložného komplexu LBr-1 (obr. 3-31) vyplývá, že ve svrchním karpátu jsou „vylazené“ vody charakteristické prakticky pro celou oblast Vídeňské pánve. Spodní baden je charakterizován vyšší salinitou, blížíci se víceméně mořskému prostředí.

Obsah celkových rozpuštěných látek v zónách iden-

tifikovaných na základě karotáže (obr. 3-31) je do 1 000 mg.l⁻¹ v zóně sladké vody, 1 000 – 3 000 mg.l⁻¹ v přechodné zóně a nad 3 000 mg.l⁻¹ v zóně brakické až mořské vody. Salinita lábského obzoru středního badenu je typická pro brakické prostředí. Od svrchního badenu přes sarmat je zjevné postupné „vyslazování“ vod. Podle trendu je možné usoudit, že ve svrchním panonu se vyskytují již jen sladké vody. Na bázi sladkých vod, resp. na povrch přechodové zóny byla sestrojena strukturní mapa. Uvedená vertikální zonalita vod na LBr-1 je v dobrém souladu s vývojovými fázemi změn sedimentárního prostředí v jednotlivých stratigrafických stupních a podstupních.

LITERATURA

- Bílek, K. (1974): Ložiska ropy a plynu v slovenskej časti vienedskej panvy. – Mineralia Slovaca, 6, 5 – 6, 399498.
- Čajka, R. – Štefanová, M. (1976): Strukturní mapa na povrch lábského obzoru 1 : 25 000. – Manuskript, archiv MND Hodonín.
- Jiříček, R. (2002): Molasový vývoj Alpsko-Karpatské předhlubně a vídeňské pánve. – Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment, Praha, 9, 1–2, 1–179.
- Káňa, K. (1998): Závěrečné zhodnocení těžby živic na nalezišti Brodské-sever včetně možností výhledového využití ložiska. – Archiv MND Hodonín, 25 s.
- Kobich, L. – Olšovský, L. (1986): Výpočet zásob ropy a zemního

- plynu náleziska Brodské. – ŠGÚDŠ – Geofond, Bratislava, 157 s.
- Nehyba, S. (2015): Litofaciální analýza a sekvenční stratigrafie rezervoáru a jeho nadloží. In: Hladík et al., Příprava výzkumného pilotního projektu geologického ukládání CO₂ v České republice (REPP-CO₂), Proj. NF-CZ08-OV-1-006-2015, Výstup V1.9, 37 s.
- Prochác R. (2013): Tektonický a sedimentární vývoj moravské části vienedskej panvy v badene. – Dizertační práce, Univerzita Komenského v Bratislavě, 1–161.
- Šelle, M. – Němec, F. – Kolesík M. (1960): Výpočet zásob nafty ložiska Brodské k 1. 7. 1960. – Archiv MND Hodonín, 86 s.

SEZNAM VÝSTUPŮ AKTIVITY 2

- V2.1 3D geometrický model s interpretovanými povrchy a bázemi s osazenými vrty
- V2.2 3D zobrazení zlomových ploch, vybraných povrchů horizontů v časové a hloubkové doméně
- V2.3 Litofaciální vrstevní model v dohodnutém modelovacím prostředí (Petrel)
- V2.4 Mapy poměru efektivní a celkové mocnosti (net/gross) vybraných horizontů
- V2.5 3D povrchy horizontů s modelem porozity a permeability

- V2.6 Mapy původních a současných kontaktů jednotlivých médií v ložiskových obzorech
- V2.7 Vertikální zonalita chemizmu vod – textová zpráva a datový soubor
- V2.8 3D statický geologický model
- V2.9 Teplotní a tlakový model v dohodnutém modelovacím prostředí (Petrel)
- V2.10 Návrh modelu geometrie nadloží potenciálního úložiště včetně koncepčního hydrogeologického modelu

< Obr. 3-31 Vertikální zonalita vrstevních vod na lokalitě LBr-1 určená na základě karotáže: postupné vyslazování od spodního badenu po panon se projevuje hlavně nárůstem resistivity na křivkách RAG2 (černá křivka).

4. Dynamické modelování

Aktivita 3 – Dynamické modelování – propojuje všechny aktivity ostatní. Přímo závisí na vyhodnocení údajů o úložném komplexu (Aktivita 1), a to jak informacích shromážděných již dříve (historických), tak i poznacích nových (laboratorních studiích). Zároveň je založena na 3D geologickém modelu rezervoáru a úložného komplexu (Aktivita 2). Aktivita 3 začala „historickým sladováním“ (tzv. *history matching*) rezervoárového modelu a jeho postupným doplňováním o nové poznatky získané během laboratorních studií. Výsledný model následně umožnil vyhodnocení různých scénářů dalšího vývoje – počínaje injektáží malého množství CO_2 v rámci pilotního projektu ukládání, přes intenzifikaci těžby uhlovodíků pomocí oxidu uhličitého (tzv. CO_2 -EOR) až po scénář ukládání CO_2 v maximálním rozsahu kapacity úložiště. V Aktivitě 3 se rovněž posuzovaly dopady geochemických (interakce CO_2 s horninami úložiště) a geomechanických (pevnostní parametry hornin) vlivů, vyhodnocovaly možné scénáře úniku CO_2 a provádělo modelování proudění mělkých podzemních vod včetně předpokládaného šíření uniklého CO_2 .

Výsledky aktivity posloužily též jako přímý vstup pro Aktivitu 4 (Posouzení rizik) a 5 (Monitoring), ale též pro další návazné činnosti v rámci projektu.

4.1 Příprava a budování modelu

Proces přípravy, budování a následného využívání modelu a výsledků simulací lze obecně graficky znázornit schématem uvedeným na obr. 4-1. Časová osa je v tomto případě rozdělena na období historické (produkční fáze a po ní následující uzavření a likvidace – tzv.

fáze P&A) a výhledové období, kdy model slouží pro vyhodnocení scénářů budoucího vývoje.

Historické období slouží pro „sladění“ modelu a jeho chování s dostupnými historickými daty. V závislosti na množství dostupných údajů se pro tento úkol nabízí použití různých nástrojů. Některé prostředky, jako jsou stávající geologický model nebo základní parametry fluid (jejich tlak, objem a teplota, tzv. PVT – *Pressure, Volume, Temperature*) a popis interakcí mezi fluidy a horninou (křivky relativní propustnosti) jsou pro přípravu rezervoárového modelu nezbytností. Jiné nástroje, například analýza tlakového přechodu (*Pressure Transient Analysis* – PTA), studie materiálové bilance nebo metoda asistovaného historického sladování („*history matching*“), mohou být použity volitelně, v závislosti na dostupnosti údajů a cílech projektu. V našem případě jsme se při přípravě modelu rezervoáru v Aktivitě 3 rozhodli jako další podpůrný nástroj využít studii materiálové bilance.

V dalším textu je popsán způsob zjišťování údajů pro PVT modelování a interakci mezi fluidy a horninami, jakož i způsob provedení studie materiálové bilance a tvorby simulačního modelu.

4.2 PVT modelování

Modelování tlaku, objemu a teploty (PVT – *Pressure, Volume, Temperature*) je metoda umožňující popsat chování kapalin za měnících se podmínek (např. při poklesu tlaku daném produktivní těžbou nebo naopak nárůstu tlaku během pozastavení těžby) anebo po změně jejich složení (daném např. injektáží CO_2). Tato metodika je za-

ložena na stavových rovnicích a vztazích vybudovaných na jejich základě. Stavové rovnice jsou zobecněné rovnice, jež se postupně zpřesňují pomocí experimentálně zjištěných hodnot. Obvykle se využívá například soubor experimentů, při nichž se postupně snižuje tlak působící na ropu při zachování konstantního celkového složení nebo celkového objemu.

Jelikož u tohoto projektu nebylo pokusy možno provést přímo na vzorcích ropy z ložiska LBr-1, použil se stabilizovaný vzorek z nedalekého ložiska Hrušky. Ten byl rekombinován s plynem tak, aby vznikl tzv. „živý“ vzorek věrně reprezentující ropu za výchozích rezervoárových podmínek. Ten byl posléze použit při experimentech. Po jejich provedení byl sestaven model stavových rovnic popisujících historické období produkce ložiska a následné období likvidace.

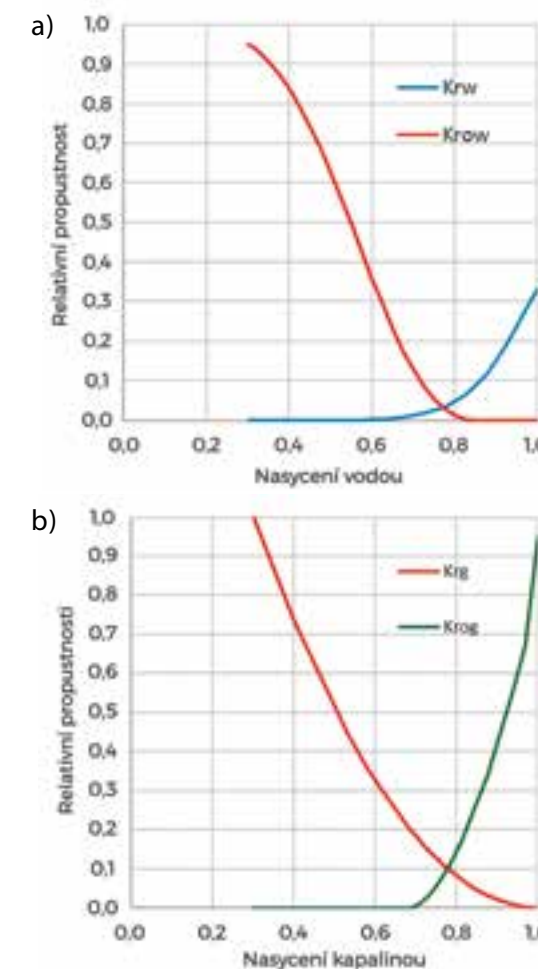
Současně proběhla řada zkoušek zkoumajících interakce mezi CO_2 a ropou v ložisku. Testy ukázaly, že za podmínek očekávaných při injektáží CO_2 do ložiska LBr-1 nebude CO_2 plně mísitelné s ropou. Přesto se CO_2 v ropě rozpustí a způsobí odpaření některých jejích složek. Model stavových rovnic byl následně náležitě upraven (pouze změnou parametrů souvisejících s interakcí CO_2 – ropa) a použit pro účely modelování výhledových scénářů.

4.3 Interakce fluid s rezervoárovými horninami

Jelikož hodnoty PVT popisují pouze chování fluid, je třeba parametry jejich proudění v rezervoáru stanovit dalším zkoumáním. Pomocí geologického modelování lze získat hodnoty propustnosti (permeability), tedy parametru vypovídajícího o schopnosti porézního média (zde rezervoárové horniny) propouštět určitou kapalinu. Je-li pórový prostor vyplněn současně několika různými kapalinami (např. vodou, ropou a plynem), závisí možnost jejich proudění (vyjádřená relativní propustností pro příslušnou kombinaci fluid) na parametrech těchto fluid a hornin jako takových, ale též na míře nasycení pórů jednotlivými fluidy (neboli jejich vzájemném objemovém poměru). Relativní propustnosti se obvykle stanovují pomocí zpětného výpočtu vycházejícího z experimentální studie, při níž se injektují různá fluida v různém pořadí při různém tlaku a rychlosti vtláčení. Výsledné křivky představují relativní propustnost pro příslušnou kapalinu jakožto funkci nasycení. Tyto křivky pro ložisko LBr-1 jsou znázorněny na obr. 4-2.

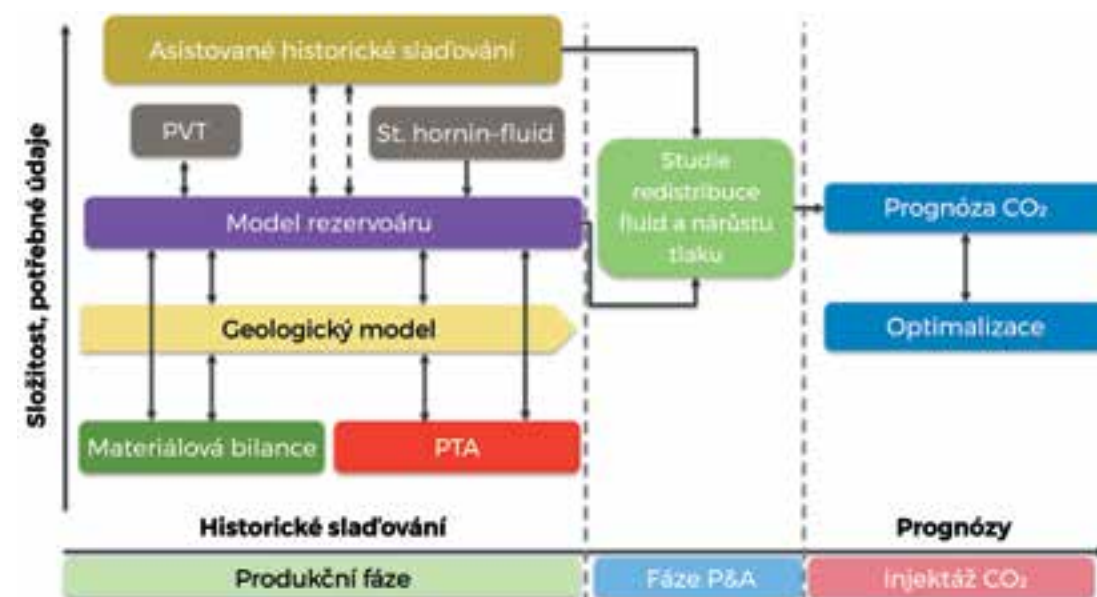
4.4 Model materiálové bilance

Model materiálové bilance spojuje změny tlaku rezervoáru s pórovým objemem rezervoáru, objemy fluid, vytěženými objemy, přítokem ze zápolního akviferu (zvodně) a injektovaným objemem, jak je přehledně znázorněno na obr. 4-3.



Obr. 4-2 Křivky relativní propustnosti (poměr fázové propustnosti vůči efektivní rezervoárové propustnosti jako funkce nasycení fluidy) použité v modelu historického sladování. Krw označuje relativní propustnost pro vodu, Kro pro ropu a Krg pro plyn.

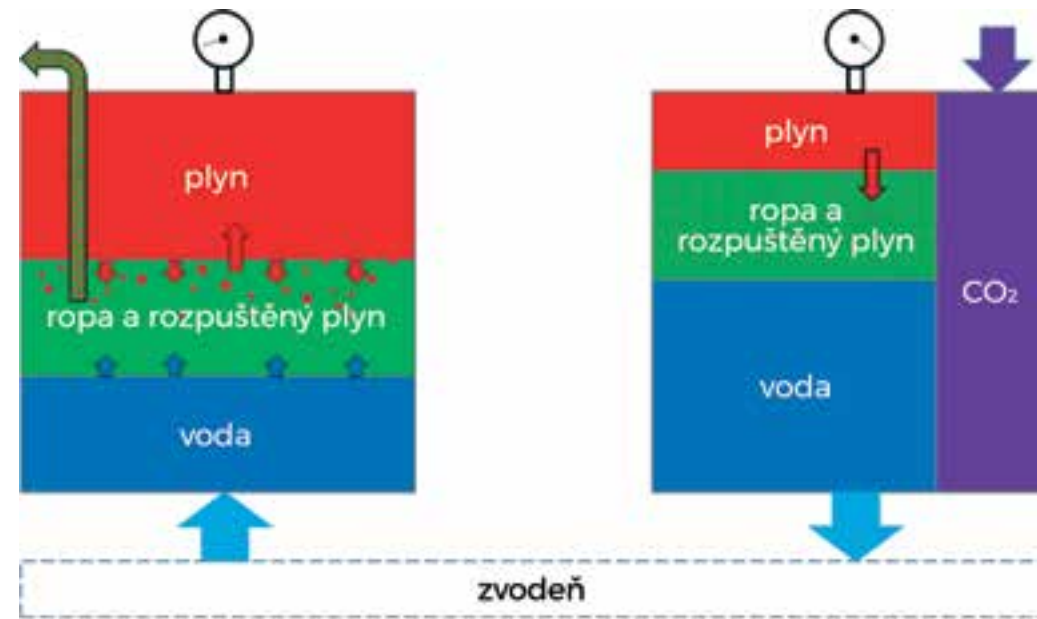
Obr. 4-1 Schéma přípravy, budování a využívání rezervoárového modelu



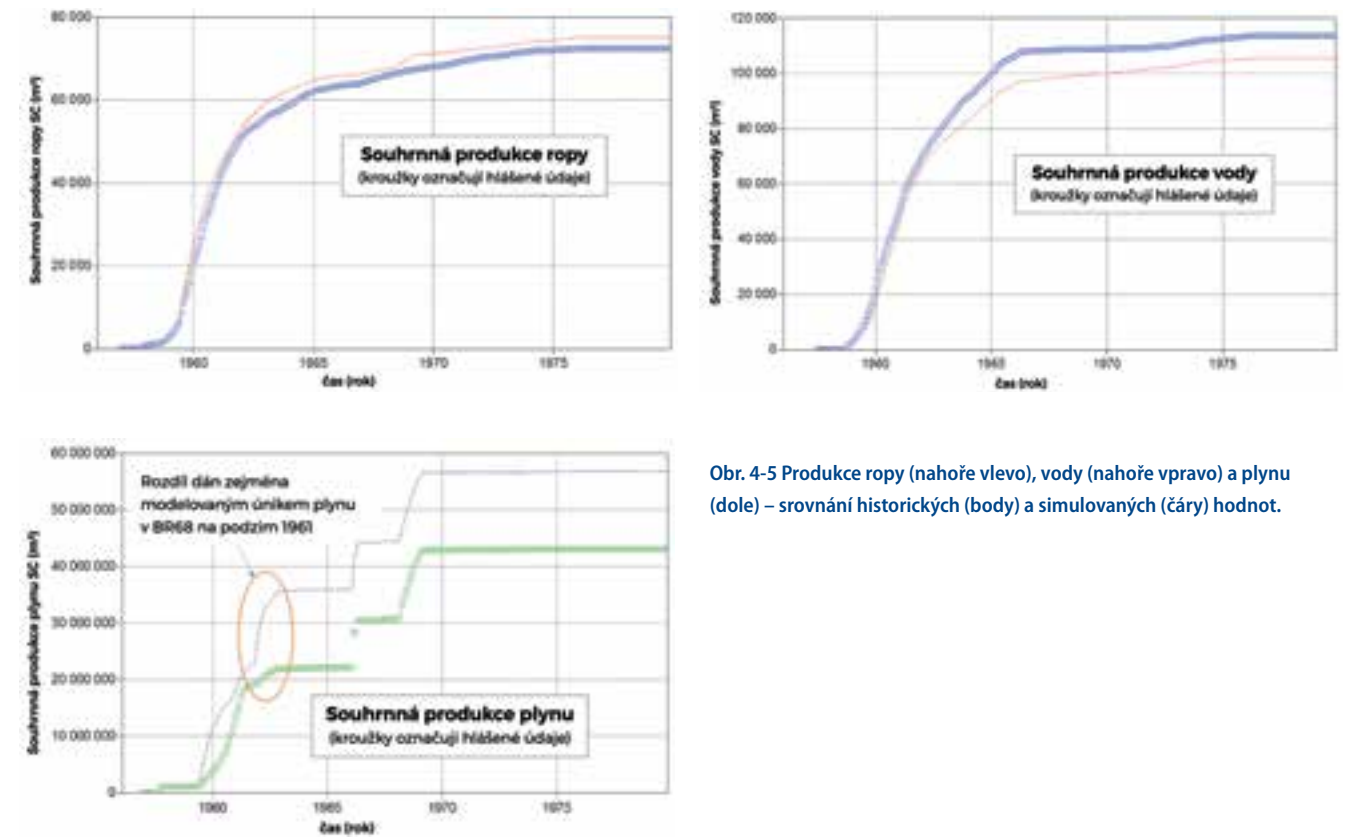
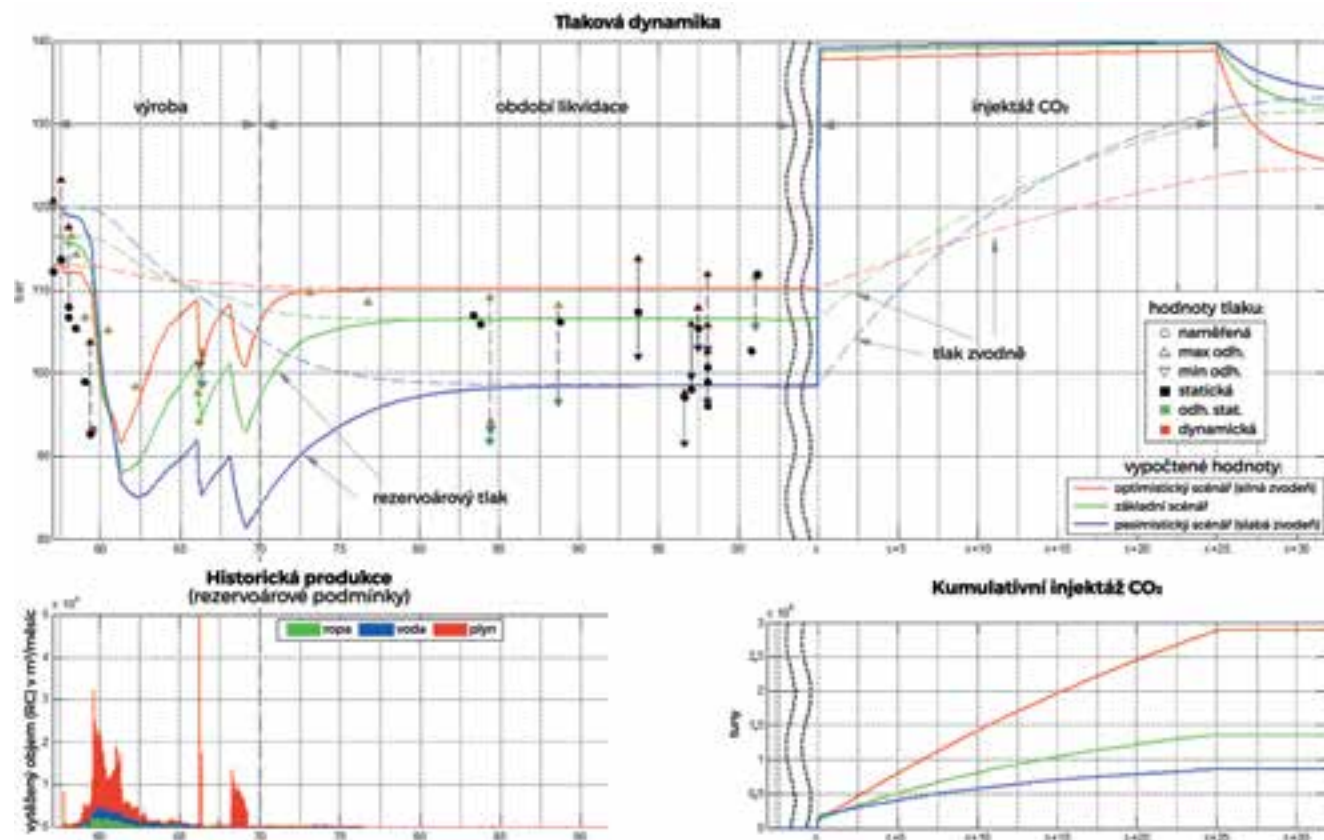
Tab. 4-1 Hodnoty výchozího a aktuálního tlaku pro tři různé realizace modelu materiálové bilance s odpovídajícími parametry akviferu.

Scénář	Výchozí tlak (bar)	Aktuální tlak (bar)	Parametry akviferu	
			objem ($\times 10^9 \text{ m}^3$)	produktivita ($\text{m}^3/\text{den}/\text{bar}$)
„optimistický“	113	~ 110	2	20
„základní“	116,5	~ 108	0,5	10
„pesimistický“	120	~ 98	0,2	5

Obr. 4-3: Schéma modelu materiálové bilance pro fáze produkce (vlevo) a injeckce (vpravo).



Obr. 4-4 Výsledky modelování materiálové bilance. Nahoře: Tlaková dynamika pro tři zvažované scénáře. Vlevo dole: Historická produkce ložiska za rezervoárových podmínek. Vpravo dole: Příslušný kumulativní objem injektovaného CO₂.



Obr. 4-5 Produkce ropy (nahore vlevo), vody (nahore vpravo) a plynu (dole) – srovnání historických (body) a simulovaných (čáry) hodnot.

o těžbě) byly vloženy do simulačního modelu rezervoáru. Pro tyto účely byl zvolen software CMG STARS, moderního komerčního simulačního nástroje, který pokrývá všechny nezbytné funkce. Jde o flexibilní, zavedený a spolehlivý nástroj pro predikci CO₂-EOR a uložného potenciálu. V této souvislosti je třeba zmínit, že modelování rezervoáru je reverzní úloha, při níž se snažíme určit výchozí parametry při znalosti odpovědi (tedy údajů z těžby). Výchozí parametry jsou přitom vždy zatíženy nejistotou a obvykle se určují nepřímě. Například geologické a geofyzikální parametry se interpretují z karotážních záznamů a přímé měření je možné pouze při použití jader pořízených během hloubení vrtů. Jádra v této souvislosti hrají zásadní úlohu, reprezentují však jen minimální část celého objemu rezervoáru. Podobně i měření relativní propustnosti vychází z parametrů jader a přímo reprezentuje pouze proudění velmi malou částí rezervoáru. Stavové rovnice jsou korelací se svou vlastní mírou nejistoty. Objem zápolního akviferu a jeho konektivita s rezervoárem (tzn. do jaké míry a jak rychle je schopen dorovnávat tlak v rezervoáru) jsou nejisté veličiny. Objemy vytěžené ropy a plynu se měřily kumulativně (tzn. jako celková těžba za období obvykle jednoho měsíce), přičemž údaje o skutečné rychlosti produkce a tlaku při těžbě jsou dostupné pouze výjimečně. Ve všech těchto případech musí být příslušný modelovací parametr uzpůsoben podle těžebních údajů.

Hlavním cílem této optimalizace, resp. historického sladování, je docílit schopnosti popsat odezvu rezervoáru na extrakci a/nebo injeckci fluid v historickém horizontu, a následně tento model využít pro predikce budoucích plánovaných procesů. Není nicméně účelné snažit se dosáhnout ideálního sladění každého datového bodu, neboť takový přístup často bývá příliš násilný a vede k „přeladění“ a deformaci modelových parametrů, která následně snižuje přesnost výstupů. Obzvláště důležité je to u projektů jako tento, kdy panuje poměrně vysoká nejistota u vstupních dat a těžištěm zájmu je primárně aktuální stav rezervoáru, nikoliv lokální specifika těžby uhlovodíků před více než čtyřiceti roky.

Grafy na obr. 4-5 znázorňují celkovou produkci fluid z rezervoáru podle těžební historie ve srovnání s výsledky simulace s využitím historicky sladěného modelu. Tento model byl následně použit pro simulace až do roku 2020. Na základě zjištěných výsledků byla posouzena reekvilibrace (znovuustavení rovnováhy) jednotlivých fází a tlaků po uzavření rezervoáru. V případě rozhraní ropa–voda a plyn–voda se předpokládá jejich vzestup řádově o 15–20 m nad původní úroveň. S ohledem na geometrii rezervoáru znamená tento vzestup zároveň migraci kontaktů o zhruba 100–150 m východním směrem. Předpokládá se, že všechny přechodné účinky způsobené produkcí uhlovodíků již pominuly a tlak je nyní v celém rezervoáru plošně konstantní.

4.6 Geochemie a geomechanika

Součástí Aktivita 3 bylo rovněž modelování geochemických a geomechanických změn v rezervoáru, vyvolaných injektáží CO₂, a to s využitím dat získaných v rámci Aktivita 1. Bylo rovněž zkoumáno propojení těchto změn do simulačního modelu. Klíčovou otázkou bylo, jak zjištěné experimentální, popř. modelové údaje využít pro účely predikce injektivit CO₂ a jeho mobility v rezervoáru během injektáže.

Pro dynamické průtočné vysokotlaké experimenty, které byly základním pilířem těchto prací, bylo bohužel k dispozici pouze velmi omezené množství materiálu z vrtných jader. Pro rozšíření znalostí o rezervoáru tak byly pokusy provedeny nejen na celohorninových, ale i na drcených vzorcích. Při experimentech byly zkoumány interakce mezi CO₂, rezervoárovými, resp. těsnicími horninami a vrstevní vodou (solankou), jakož i změny způsobené těmito interakcemi.

Při průtočných experimentech byly pozorovány určité změny ve složení propustných hornin (tzn. v rezervoárové části) v důsledku geochemických interakcí. Přestože výsledky experimentů naznačují určité obecné trendy, malý počet vzorků neumožnil docílit jednoznačné interpretace těchto výsledků, která by byla aplikovatelná na celý objem rezervoáru.

Geochemické interakce byly posléze rovněž modelovány pomocí SW využívaných pro dynamické geochemické modelování (The Geochemist's Workbench, PHREEQC a TOUGHREACT), a to pro různé časové horizonty. Hlavními geochemickými jevy, které byly predikovány, jsou rozpouštění živců, chloritu a primárních karbonátů, srážení muskovitu, kaolinitu a relativně velkého množství křemene, a také srážení sekundárních karbonátových minerálů ankeritu a dawsonitu. Zmíněné změny s sebou přinášejí i mírné změny porozity hornin, které však nepřesahují jednotky procentních bodů a nejsou proto pro úložnou kapacitu rezervoáru příliš významné.

Vzhledem k nejednoznačnosti výsledků a omezenému množství vzorků pro experimenty bylo nakonec rozhodnuto, že geochemické vlivy nebudou v této fázi do simulací rezervoáru zahrnuty. Nelze totiž posoudit, zda je pozorované chování reprezentativní pouze pro studovaný vzorek jádra nebo zda ho lze zobecnit i pro určitou část rezervoáru či rezervoár celý.

Při studiu vlivu geochemických změn na geomechanické parametry úložného komplexu bylo zjištěno, že povrchové interakce mezi těsnicí horninou a pronikajícím CO₂ nijak znatelně nenarušují stabilitu horniny. Geomechanické analýzy zároveň potvrdily poměrně nízkou pravděpodobnost reaktivace zlomů v případě, že injektáž bude probíhat při tlaku menším nežli 130 % hydrostatického tlaku v hloubce rezervoáru. Tento limit byl použit pro všechny simulace.

4.7 Posouzení mobilizace ropy působením CO₂

První odhad schopnosti CO₂ mobilizovat ropu byl proveden na základě simulací v měřítku vrtných jader (tzn. řádu centimetrů), s využitím výsledků provedených experimentů a údajů z vrtných jader. Simulace prokázaly, že v tomto malém měřítku je CO₂ velmi účinný: ropa, jež se dostane do styku s CO₂, je mobilizována a uvolněna, což je zcela v souladu s experimentálně zjištěnými výsledky. Při simulaci v měřítku jader je CO₂ schopen uvolnit prakticky veškeré zbývající uhlovodíky. V reálném měřítku celého ložiska však účinnost injektáže CO₂ bude výrazně nižší, neboť plyn se v důsledku gravitační segregace, prstovitého pronikání („fingering“) a dalších makroskopických jevů nedostane do styku s veškerou zbývající ropou.

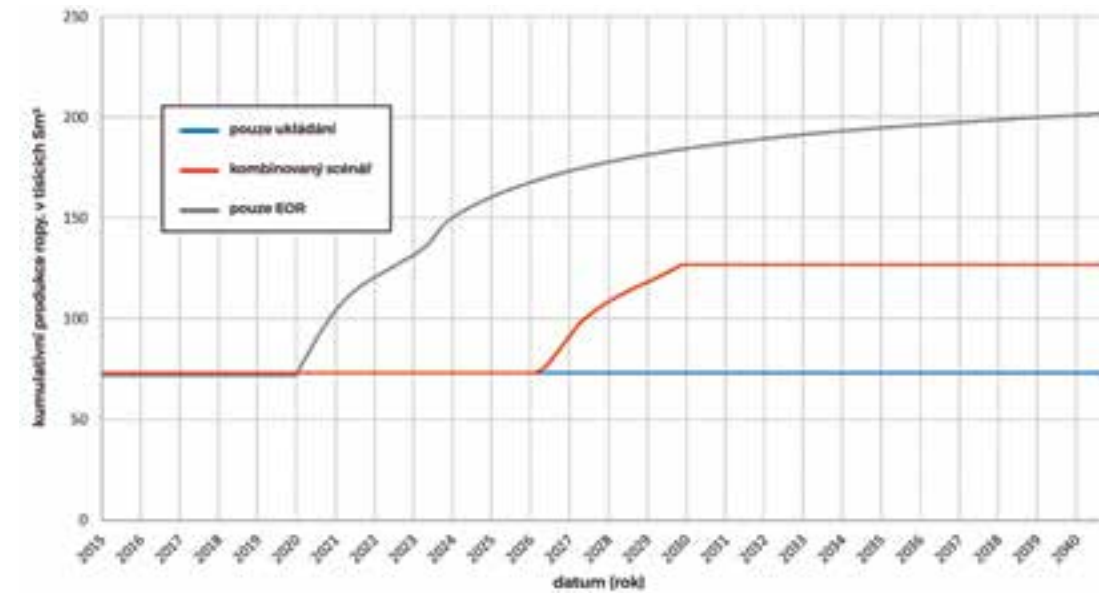
4.8 Scénáře a výsledky

Výše uvedené výsledky poskytly kvalitní základ pro vyhodnocení různých scénářů injektáže CO₂. Simulovány byly tři hlavní scénáře:

- **Ukládání:** Pilotní injektáž CO₂ v rozmezí let 2020–2026 s následným plnohodnotným projektem ukládání v maximálním rozsahu kapacity úložiště mezi roky 2026–2040. Pilotní část předpokládá uložení 70 000 t CO₂ v průběhu 6 let s využitím 1 injektážního vrtu. V souladu s platnými předpisy je pilotní injektáž omezena tak, aby celkové množství uloženého CO₂ v součtu nepřesáhlo hodnotu 100 000 tun, na niž jsou vázána legislativní omezení. Období šesti let se považuje za nezbytné pro řádné vyzkoušení a ověření injektážních a monitorovacích konceptů.
- **Intenzifikace těžby (EOR):** Obnovení těžby ropy v roce 2020 s následným nasazením CO₂-EOR v období let 2026 až 2040.
- **Kombinovaný scénář:** Pilotní injektáž CO₂ v letech 2020–2026 s následnou tříletou těžbou ropy v období 2026–2029 a poté čistým ukládáním CO₂ mezi roky 2029 a 2040. Tříleté období těžby bylo zvoleno na základě zkušeností z jiných projektů intenzifikace, při nichž se zhruba 50 % dodatečně uvolněné ropy podařilo vytěžit během prvních tří let, po nichž následoval postupný pokles produktivity.

U výše uvedených scénářů nebyly provedeny detailní optimalizace ani technicko-ekonomické posouzení. Tyto varianty popisují pouze základní možnosti rozvoje ložiska pro v rámci technologie CCUS (Carbon Capture, Use and Storage, tj. zachytávání, využívání a ukládání oxidu uhličitého): od možností zaměřených čistě na využívání nebo ukládání až po kombinovanou variantu CCUS.

Klíčovými ukazateli pro všechny tři scénáře jsou souhrnné množství vytěžené ropy a souhrnné množství uloženého CO₂, které prakticky vyjadřují hospodářský užitek daných scénářů, respektive jejich přínos v boji



Obr. 4-6 Souhrnný objem těžby ropy v případě tří zvažovaných scénářů – EOR, ukládání a kombinovaného řešení. Výchozí hodnota v roce 2015 odpovídá historické produkci.

proti klimatickým změnám. Nižší uvedený graf zobrazuje úhrnné množství vytěžené ropy pro tři výše popsané scénáře a období 2015–2040. Zcela podle očekávání je předpokládané množství vytěžené ropy nejvyšší v případě scénáře preferujícího pouze EOR (viz obr. 4-6).

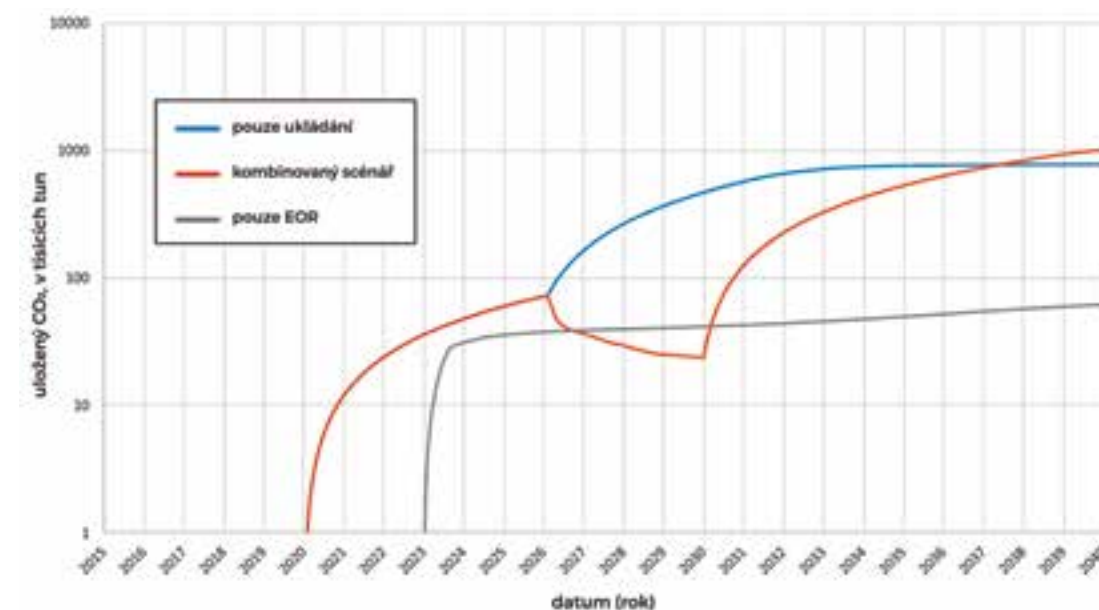
U scénáře „pouze EOR“ je však zároveň nejnižší celkové čisté množství uloženého CO₂ (viz obr. 4-7). Za pozornost však stojí skutečnost, že kombinovaná varianta v konečném součtu umožňuje uložení většího množství CO₂ nežli scénář zaměřený čistě na ukládání, což je dáno dodatečným objemem vytěžených uhlovodíků (povšimněte si logaritmického měřítka osy Y na obr. 4-7). Hlavním důvodem nízké účinnosti u scénáře EOR je vysoká míra recirkulace CO₂ (po průniku CO₂ do těžebních vrtů je třeba jej separovat a reinjektovat).

Klíčovým poznatkem je skutečnost, že kombinovaný

scénář umožňuje nejen dotěžit značné množství ropy, ale i dosáhnout nejlepších výsledků při prevenci změn klimatu. Propočty naznačují, že v případě spalování veškeré ropy pocházející z ložiska LBr-1 (tzn. množství vytěženého v minulosti i předpokládaného objemu dotěženého při kombinovaném scénáři) by za předpokladu uvolnění ca 433 kg CO₂ na barel ropy bylo v rezervoáru možné uložit více CO₂, nežli se při spalování uvolnilo. Celková uhlíková bilance ložiska by tak u kombinovaného scénáře byla negativní – viz obr. 4-8.

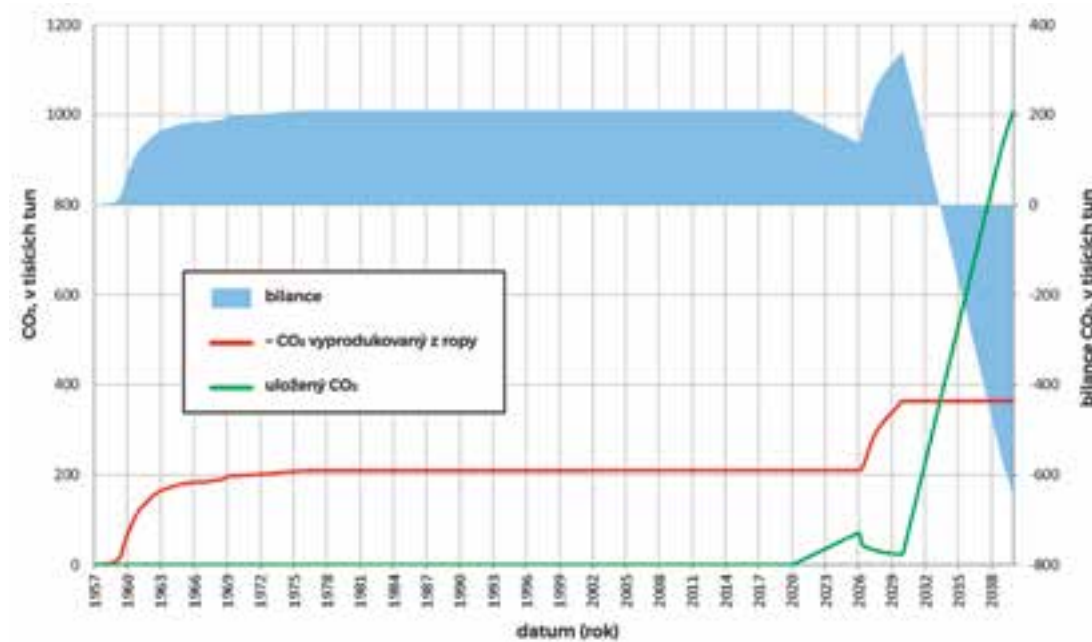
4.9 Simulace potenciálních úniků CO₂ z úložiště

V rámci Aktivita 3 byly provedeny dva různé typy simulací zaměřené na potenciální úniky CO₂ z úložiště. Nej-



Obr. 4-7 Souhrnný objem uloženého CO₂ u jednotlivých scénářů.

Obr. 4-8 Odhad množství CO₂ vyprodukovaného následkem těžby (červená křivka) a uloženého do rezervoáru (zelená křivka) vyjádřené v tisících tun na levé ose Y ve srovnání s celkovou uhlíkovou bilancí rezervoáru (vystínovaná oblast) vyjádřenou v tisících tun na pravé ose Y



prve byla ve spolupráci CVŘ a IRIS pomocí analytického modelu posouzena možnost úniku přes cementové mostky ve vrtu a související nejistoty spojené se spolehlivostí vstupních dat. Výsledky ukazují, že riziko úniku skrz cementové mostky je nízké. Dokonce i u starých vrtů je pravděpodobnost úniku značného množství CO₂ přes tyto mostky nízké; s výjimkou vysoce nepravděpodobné situace celkového selhání všech opatření by únik značného množství CO₂ trval dlouhou dobu. Získané výsledky byly dále využity a rozpracovány při posuzování rizik v Aktivitě 4.

Simulační model rezervoáru byl využit i k posouzení důsledků nepravděpodobného scénáře náhlého intenzivního úniku v důsledku erupce vrtu (tzv. *blowout*) během injektáže nebo bezprostředně po ní. Dokonce i v tomto případě by došlo k uvolnění méně než 10 000 tun CO₂ spolu se zhruba 70 m³ vody a 100 m³ ropy. Z výsledků následného modelování dopadů takového úniku na podzemní vodu (viz kap. 4.10) pak vyplývá, že ani při tomto nerealistickém scénáři není důvod očekávat katastrofické dopady.

4.10 Modelování mělkého proudění podzemní vody

Cílem tohoto úkolu bylo sestavit model proudění podzemních vod a model transportní, který by umožnil posoudit v rámci analýzy rizik potenciální ohrožení kvality podzemních vod v mělké kvartérní zvodni. Modelované území zahrnovalo hydrogeologický rajón č. 1652 „Kvartér soutokové oblasti Moravy a Dyje“. Předmětem numerického modelování byl zvodněný systém fluviálních kvartérních sedimentů, jež tvoří sedimentární výplň jmenovaného hydrogeologického rajónu.

Hydraulický model byl kalibrován v ustáleném stavu, přičemž pro kalibraci bylo vybráno 142 objektů z databáze ČGS-Geofondu. U vybraných objektů byl v rámci

Aktivity 1 v průběhu roku 2015 a 2016 proveden opakovaný záměr hladin podzemních vod (viz kap. 2.7).

V průběhu kalibrace modelu byly laděny tyto hodnoty:

- koeficient filtrace K , jehož výsledné hodnoty se pohybovaly v řádech $\times 10^{-4}$ až $\times 10^{-3}$ m/s,
- přetoku do modelu (výsledné hodnoty se pohybovaly v řádech $\times 10^{-8}$ m²/s/m až $\times 10^{-6}$ m²/s/m),
- efektivní infiltrace (výsledná hodnota 0,0009 m/den resp. 32 mm/rok).

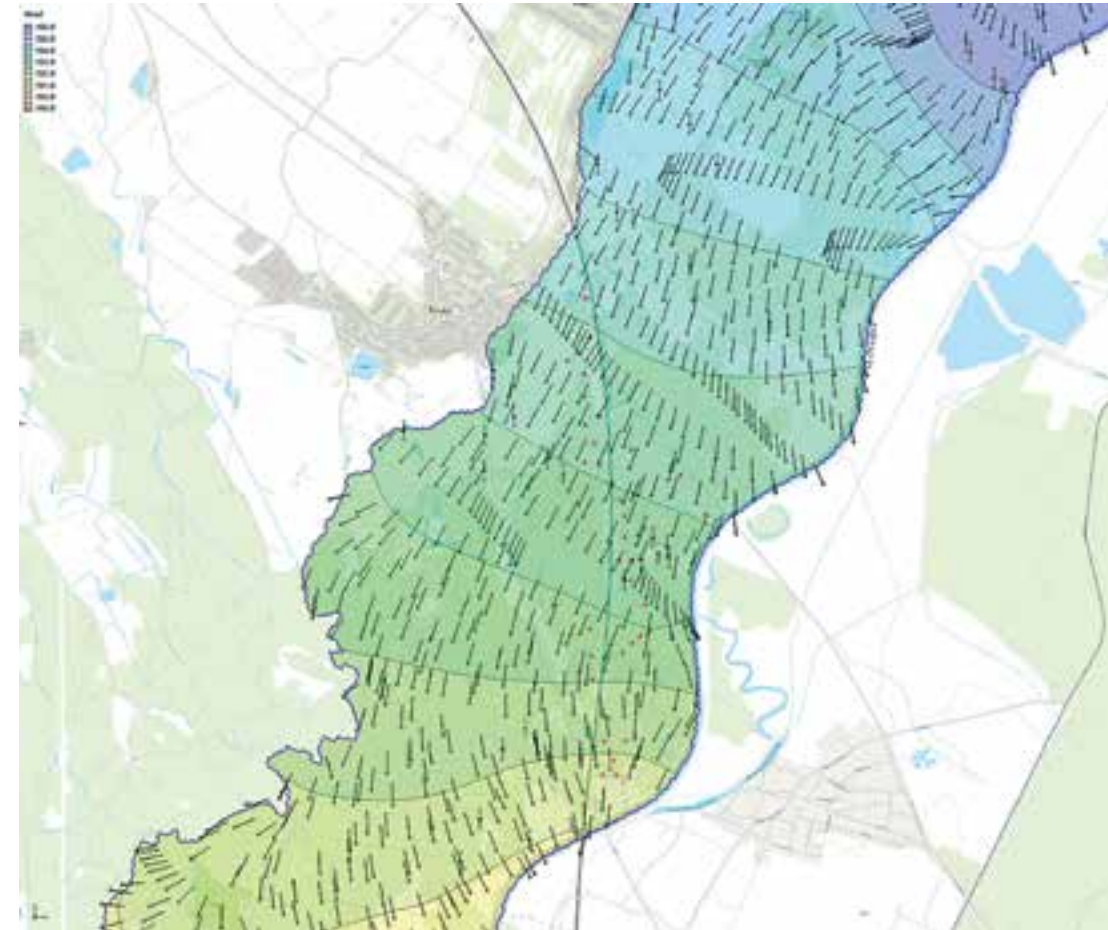
Kalibrace byla ukončena s průměrnou odchylkou $ME = 0,14$ m, průměrnou absolutní odchylkou $MAE = 0,33$ m a kvadratickým průměrem $RMS = 0,41$ m.

Celkové zdroje modelu včetně indukovaných, tj. infiltrace ze srážek + přetoky přes okrajové podmínky, byly vypočteny na cca 60 l/s. Největší část zdrojů představuje efektivní infiltrace – tj. infiltrace ze srážek po odečtení evapotranspirace. Část přítoků do modelu je situována podél okrajových podmínek reprezentujících úseky přítoků z vyšších teras či přítok ze severu údolní nivou Moravy.

Podzemní vody jsou v drtivé většině drénovány povrchovými vodotečemi. Celková hodnota tohoto propadu je cca 60 l/s.

Celková infiltrace ze srážek je cca 48 l/s, což při rozloze modelovaného území odpovídá specifickému základnímu odtoku 1,04 l/s/km².

Model transportu rozpuštěných látek byl sestaven s cílem posoudit scénáře ohrožení kvality vody mělké zvodně kvartérního kolektoru při případném úniku CO₂ z úložného horizontu. Pro posouzení, modelování a simulace geochemických reakcí, které by bylo možno očekávat v případě průniku CO₂ uniklého z úložiště horninovým prostředím až do mělkého akviferu, je třeba znát horninové složení tohoto akviferu. Protože v data-



Obr. 4-9 Model proudění podzemních vod v přípořkové kvartérní zvodni – simulované hydroizohypsy s vyznačením vektorů proudění podzemních vod (detail užší zájmové oblasti).



Obr. 4-10 Simulovaný mrak koncentrace iontů H⁺ pro nerealistický scénář dlouhotrvajícího masivního výronu CO₂ po 10 letech transportu (detail užší zájmové oblasti).

bázích ani v literatuře nebyl nalezen dostatek vhodných dat, byly potřebné údaje zajištěny pomocí odběrů čerstvých vzorků hornin a podzemní vody přímo na lokalitě a jejich následných chemických a mineralogických analýz. Podle výsledků analýz nebyla ve zkoumaném akviferu zjištěna významnější přítomnost rizikových minerálů obsahujících nebezpečné prvky (např. těžké kovy), které by mohly být v případě zvýšené přítomnosti CO₂ mobilizovány. Po zvážení těchto výsledků bylo rozhodnuto, že se modelování účinků úniku CO₂ na mělkou zvodně soustředí přednostně na změny acidity (pH).

Na základě simulací úniků přes cementové mostky (viz kap. 5.3) byl identifikován potenciální rozsah úniku CO₂ v množství 100–1000 kg/rok z vrtu Br-89. Tento scénář vykázal pouze naprosto zanedbatelné snížení pH z původního 7,5 na 7,2 (geochemický model PHREEQC). Bylo možné předpokládat, že simulace transportu by při uplatnění dalších útlumových procesů nepřinesla výsledky nad mírou rozlišitelnosti vůči pozadí.

Proto byl pro simulaci nakonec využit nerealistický scénář dlouhotrvající erupce vrtu (viz kap. 4.9), předpokládající únik v rozsahu 111 458 kg CO₂/rok, který by znamenal lokální snížení hodnoty pH ze 7,5 na 5,4. Výsledky simulace ukazují, že mrak sníženého pH (ve formě koncentrace H⁺) pod původní hodnoty by po 10 letech advektivně-disperzního transportu z konstantního zdroje

byl cca 1.1 km dlouhý, přičemž v převážné části této oblasti by změna byla velmi nepatrná (viz obr. 4-10). Tento výsledek prokazuje, že i v případě extrémně vysokého úniku CO₂, který nepředpokládá žádný scénář analýzy rizik, není kvalita podzemní vody regionálně významněji zhoršena.

SEZNAM VÝSTUPŮ AKTIVITY 3

V3.1 PVT model, průběžné výsledky analýz	V3.11 Analýza výsledků různých scénářů injektáže a doporučení vhodných postupů
V3.2 Inicializace simulačního modelu	V3.12 Posouzení geomechanických efektů spojených s injektáží CO ₂ a výstupy pro simulace a analýzu rizik
V3.3 "History match" model pro simulaci úložiště	V3.13 Simulační model s geochemickými efekty
V3.4 Scénáře pro různé injektážní rychlosti	V3.14 Vyhodnocení rizika a objemů potenciálních úniků CO ₂ z úložiště
V3.5 „Upscaling“ laboratorních výsledků na úroveň ložiska	V3.15 Numerický model proudění mělkého oběhu podzemních vod v nadloží potenciálního úložiště jako prostředek pro posouzení kontaminace podzemní vody úniky CO ₂
V3.6 Integrace výsledků do modelu ložiska	
V3.7 Posouzení změn v okolí vrtů v období od uzavření ložiska	
V3.8 Posouzení mobilizace ropy v důsledku injektáže CO ₂ na základě „upscalingu“ laboratorních studií	
V3.9 Posouzení objemu vytěžitelné ropy pomocí injektáže CO ₂	
V3.10 Soubor výsledků simulací pro další analýzu	

5. Posouzení rizik

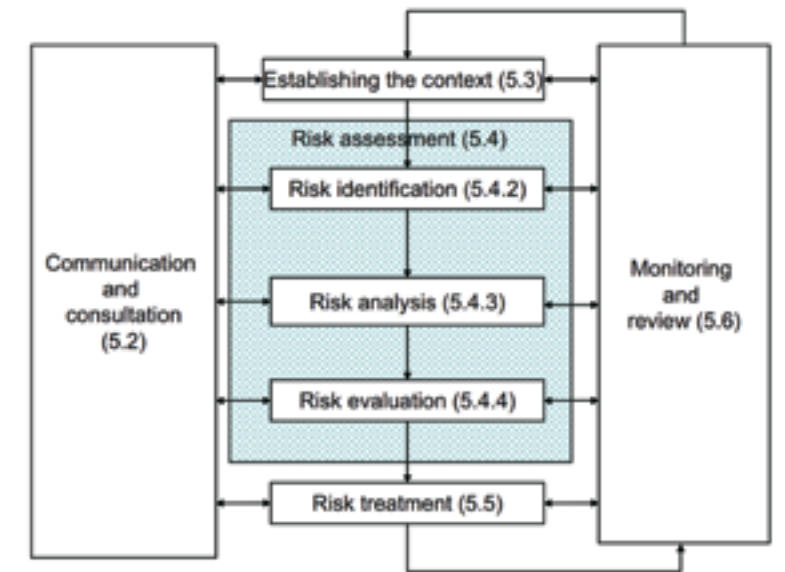
5.1 Celkový rámec prací na posouzení rizik

Posouzení rizik bylo v projektu REPP-CO₂ náplní Aktivity 4. V jejím rámci byly pokryty všechny hlavní kroky procesu posuzování rizik podle normy ISO 31000:2009 tak, jak jsou popsány na obr. 5-1.

První fází celého procesu je *identifikace rizik*, která zároveň tvoří základ pro následné činnosti. Určují se při ní zdroje rizik, jejich příčiny, preventivní a mitigační opatření a bariéry, jakož i důsledky identifikovaných rizik. V následujícím kroku *analýzy rizik* se podrobněji zkoumají nejdůležitější rizika – vyhodnocuje se u nich pravděpodobnost výskytu a důsledky jejich dopadů, ale též účinnost protiopatření a bariér. Závěrečné *hodnocení rizik* pak srovnává analyzovaná rizika s příslušnými kritérii pro posouzení přijatelnosti a zajištění vstupů pro rozhodovací proces.

Hodnocení rizik se zakládá na následujících předpokladech a omezeních:

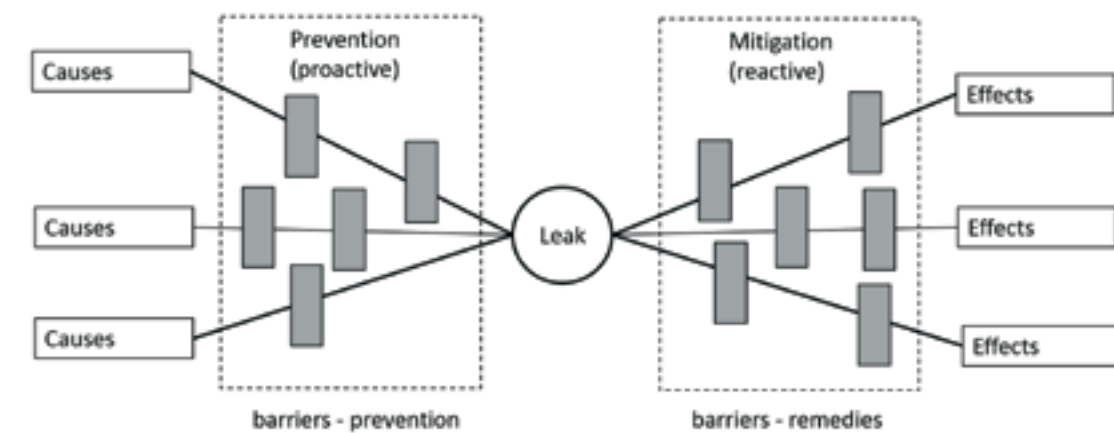
- Identifikovaná rizika související s provozem úložiště byla omezena pouze na rizika týkající se procesů transportu, injektáže a ukládání CO₂. Rizika související se zachycováním CO₂ nebyla brána v potaz.
- Posuzovaný injektážní scénář odpovídá základnímu scénáři pilotního projektu ukládání CO₂ (viz kap. 4.8). Ten předpokládá injektáž 70 000 t CO₂ během šestiletého období. Rizika související s vyšším rozsahem injektáže nebyla podrobněji zkoumána.
- U potenciálních následků událostí vedoucích k úniku CO₂ z úložiště se zkoumají pouze jejich dopady na provoz, lidské zdraví a životní prostředí.
- Území, pro něž se hodnotí rizika, odpovídá zájmové oblasti vyznačené červenou barvou na obr. 2-6 (jde zároveň o oblast pokrytou 3D seismickým průzkumem).
- Spektrum důsledků se omezuje především na CO₂, CH₄ (metan) a ropu. Možný je též únik solanek; jeho potenciální důsledky zde však nebyly zkoumány. Nečistoty v injektovaném CO₂ nejsou zohledněny.



- Analýza nebere v potaz vlivy migrace oblaku CO₂.
- Scénáře úniků popsané v této analýze nejsou úplným výčtem, ale výběrem nejpravděpodobnějších scénářů pro ložisko LBr-1.
- U simulací náhlého intenzivního úniku (tzv. *blowout*) převládá obecně vysoká míra nejistoty, v případě CO₂ to pak platí dvojnásob. Jejich výsledky jsou tak pouze orientační a je u nich třeba počítat se značným prostorem pro chyby.

Pro účely posouzení rizik byla jako základní systémový model zvolena metoda motýlkové (tzv. *bow-tie*) analýzy. Jde o jednoduchý schematický způsob popisu a analýzy cest rizik od fáze nebezpečí až po výsledek a kontrolu opatření. Jedná se de facto o logické propojení „stromu poruch“ (*fault tree*) zkoumajícího příčiny události (která je znázorněna uzlem uprostřed motýlkového

Obr. 5-1 Proces řízení rizik podle normy ISO 31000:2009.



Obr. 5-2 Motýlkový diagram znázorňující hlavní složky procesu posouzení rizik. Diagram se čte zleva doprava.

diagramu) a „stromu událostí“ (*event tree*) zkoumajícího její následky (ISO, 2009).

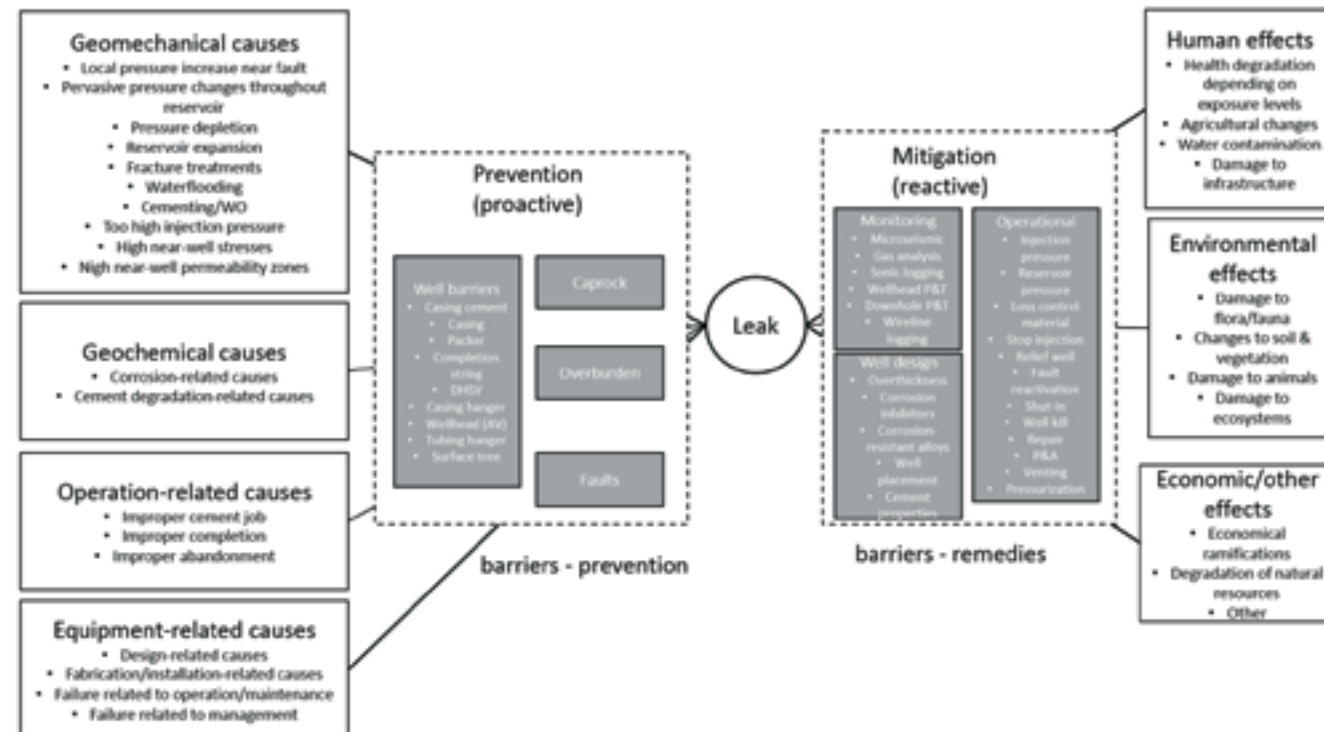
Obr. 5-2 zachycuje motýlkový diagram pro posuzovanou událost „únik fluid z úložiště“ (označeno „Leak“), která je znázorněna kolečkem uprostřed schématu. Levá část diagramu se zaměřuje na možné příčiny úniku a preventivní opatření (bariéry), které mají bránit tomu, aby k němu došlo. Pravá strana se pak zaměřuje na popis nápravných bariér, sloužících ke zmírnění dopadů úniku, jakož i následků, které únik může způsobit, pokud k němu dojde.

5.2 Identifikace rizik

Identifikace rizik souvisejících s únikem CO₂ z úložiště proběhla pomocí dvou různých přístupů. Šlo jednak o analýzu jevů, událostí a procesů (*Features, Events, Processes, FEP*), jednak bariérový přístup. Tyto dva přístupy byly zvoleny na základě předchozích zkušeností a kompetencí členů analytického týmu, kteří působili v různých odvětvích – jaderné energetice, kde metoda FEP vznikla (partner ÚJV), a ropném průmyslu na norském kontinentálním šelfu (NCS), kde bariérový přístup patří k běžnému standardu (partner IRIS).

První identifikované FEPy spolu s příslušnou bariérovou analýzou sloužily jako základ pro vypracování podrobného motýlkového diagramu pro úložiště LBr-1 (viz obr. 5-3), který souhrnně zachycuje zjištěné možné příčiny úniku, související preventivní i zmírňující bariéry a následky úniku.

Obr. 5-3
Motýlkový diagram s jednotlivými součástmi procesu posouzení rizik popisovanými v této kapitole (vazby mezi příčinami a bariérami, resp. mezi bariérami a následky byly zjednodušeny).



5.3 Analýza rizik

Posouzení pravděpodobnosti

Posouzení pravděpodobnosti výskytu jednotlivých událostí je založeno na hrubém klasifikačním schématu pravděpodobnosti, v němž je každý rozsah pravděpodobnosti přiřazen určité úrovni četnosti výskytu a obecné interpretaci dané úrovně.

Jednotlivým scénářům úniku vycházejícím z výsledků identifikace rizik byly na základě posouzení a vyhodnocení přiřazeny následující pravděpodobnosti (viz tab. 5-1).

Zvláštní pozornost byla kladena na dva hlavní scénáře úniku – únik podél likvidovaných vrtů (postupný průnik přes cementové mostky nebo jiné bariéry vrtu) a náhlý intenzivní únik z injektážního (nebo jiného aktivního) vrtu.

Likvidované vrtvy – simulace úniků

K odhadu míry úniků byl použit model CO2CARE (2012). Tento model je založen na principu průtoku tekutiny (fluida) porézním médiem podle vzorce:

$$q_v = (\kappa \cdot \kappa_r) / \mu (\Delta P / \varepsilon + \Delta \rho \cdot g)$$

kde q_v je objemový průtok tekutiny, κ koeficient propustnosti cementu, κ_r jeho modelová relativní propustnost pro danou tekutinu, μ viskozita tekutiny, ΔP rozdíl tlaků v důsledku přetlaku rezervoáru způsobeného injekcí, ε tloušťka zátky, $\Delta \rho$ rozdíl hustoty plynu a solanky a g gravitační zrychlení. Rychlost úniku CO₂

Scénář úniku	Rozsah pravděpodobnosti výskytu (za rok)	Klasifikace
Úniky z vrtů		
Únik injecktážním vrtem do atmosféry	$8,08 \cdot 10^{-5}$	Výskyt se neočekává ani nepředpokládá
Náhlý intenzivní únik (<i>blowout</i>) z injecktážního vrtu během hloubení	$7,2 \cdot 10^{-5}$	Výskyt se neočekává ani nepředpokládá
Únik z likvidovaného vrtu do atmosféry	$4,49 \cdot 10^{-3} - 4,4 \cdot 10^{-2}$	Očekáván pouze nízký výskyt / očekáván nejméně jednou za 10 let
Úniky z rezervoáru		
Únik těsnicí horninou v důsledku postupného narušování integrity	$< 10^{-6}$	Velice nepravděpodobné a prakticky nereálné
Únik těsnicí horninou v důsledku náhlého katastrofického selhání	$< 10^{-6}$	Velice nepravděpodobné prakticky nereálné
Únik stávajícími zlomy v důsledku nárůstu tlaku	$< 10^{-6}$	Velice nepravděpodobné a prakticky nereálné
Únik nově vyvolanými zlomy v důsledku nárůstu tlaku	$< 10^{-6}$	Velice nepravděpodobné a prakticky nereálné
Úniky přes body přetoku	$< 10^{-6}$	Velice nepravděpodobné a prakticky nereálné

Tab. 5-1
Pravděpodobnostní hodnocení identifikovaných scénářů úniku.

a průniku CO₂ skrze cementový mostek vyjadřují v uvedeném pořadí následující rovnice:

$$Q_m = q_v \cdot \rho (\pi \cdot D^2) / 4$$

$$T_s = \varepsilon \cdot \Phi / q_v [(1 - S_g) \cdot S_c / \rho + S_g]$$

kde ρ je hustota CO₂, D je průměr vrtu, ε tloušťka cementového mostku, Φ porozita cementu, S_g nasycení cementu plynem (tzn. objemový zlomek přítomných fluid) a S_c rozpustnost CO₂. První člen ve druhé rovnici vyjadřuje CO₂ rozpuštěný ve vodě, druhý člen pak plyný CO₂ v pórovém objemu.

S využitím známých hodnot vstupních parametrů ve spojení s odborným odhadem a údaji z literatury byly provedeny simulace úniků metodou Monte Carlo.

Simulacemi zjištěné úniky CO₂ jsou lze považovat za velmi malé (viz obr. 5-4). Za předpokladu injecktážního

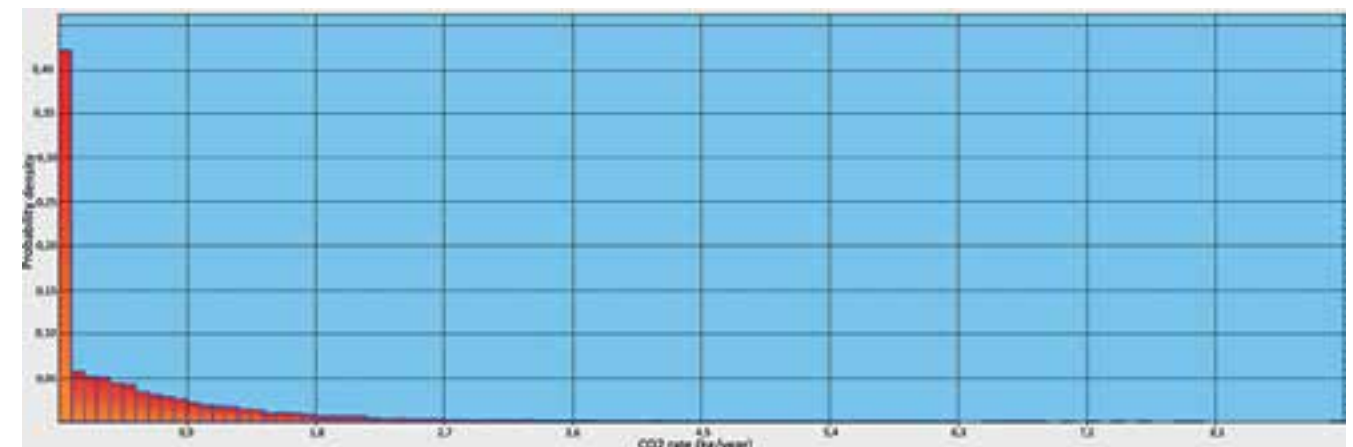
scénáře zhruba 11 700 t/rok by tyto úniky činily $<< 1 \%$ tohoto objemu. Úniky se považují za velké, dosáhnu-li objemu > 1000 t/rok.

Při náhodném výběru vzorku mezi likvidovanými vrtvy vychází průměrný rozsah úniku na 0,008 m³/den (tzn. 0,6 kg/rok) při maximální hodnotě 0,015 m³/den (10,5 kg/rok). Minimální čas před únikem CO₂ je 10 let, průměrná (očekávaná) hodnota však činí 293 000 roků. Pouze vrtvy Br-60 a Br-73 mají hodnoty v percentilu 90 větší než 4 kg/rok, což odpovídá skutečnosti, že pouze u těchto dvou vrtů je celková mocnost cementových mostků menší než 100 m.

Odpovídající výsledky pro únik CH₄ naznačují průměrný únik CH₄ ve výši 0,002 m³/den (tzn. 0,4 kg/rok) při maximální hodnotě 0,021 m³/den (tzn. 5,6 kg/rok). Nejnižší čas před únikem CH₄ je 1,7 roků, ovšem střední (očekávaná) hodnota činí přibližně 28 100 roků.

Průběžné citlivostní analýzy dat o únicích ukazují

Obr. 5-4 Výsledky simulací úniku CO₂ skrz cementové mostky – horizontální osa odpovídá množství uniklého CO₂ v kg/rok, vertikální osa hustotě pravděpodobnosti příslušného výsledku



na silnou korelaci mezi propustností cementového mostku a rychlostí úniku CO₂, jakož i silnou nepřímou úměrou mezi menší mocností cementového mostku a vyššími úniky.

Pouze u nejhoršího kombinovaného scénáře předpokládajícího kompletní degradaci materiálu cementového mostku v kombinaci s jeho mocností menší než 5 m by únik CO₂ (v případě úniku přes tento mostek) byl větší než 100 kg/rok; přesto by se stále držel pod hranicí 1 t/rok.

Injektážní vrty – simulace náhlých intenzivních úniků

K náhlému intenzivnímu úniku (tzv. *blowout*) látek z injektážních vrtů může dojít buď při jejich hloubení, nebo během provozu. V prvním případě hrozí pouze únik ropy a zemního plynu (CH₄), v případě druhém pak přichází v úvahu též únik CO₂. Maximální rozsah takto uvolněných látek by byl do značné míry dán umístěním injektážních vrtů. V případě výronu z oblasti nasycené plynem lze očekávat únik o několik řádů vyšší nežli při výronu z oblasti nasycené ropou, kde by se plyn uvolňoval v rámci dvoufázového proudění.

Očekávaná rychlost náhlého intenzivního úniku ropy se pohybuje na úrovni 75 m³/den při maximální předpokládané rychlosti 265 m³/den. V případě dvoufázového úniku ropy i plynu z oblasti nasycené ropou, který je v tomto případě uvažován, leží očekávaná (střední) hodnota výronu plynu na úrovni 2 650 Sm³/den (cca 1,9 t/den) při maximu 9 350 Sm³/den (cca 6,7 t/den), jak je patrné z obr. 5-5.

V případě CO₂ lze při uvažované přítomnosti roztoku ropa/CO₂ a za předpokladu, že při náhlém úniku zůstane přibližně zachován poměr CO₂ k zemnímu plynu, tedy při použití poměru 0,83, očekávat průměrnou hodnotu úniku zhruba 2 200 m³/d (tzn. ca. 4,3 t/d při 20 °C a tlaku 1 atm) a maximum přibližně 7 760 m³/d (tzn. ca. 15,3 t/d při 20°C a 1 atm).

Statistiky z vrtů na kontinentálním šelfu ukazují, že doba potřebná na zvládnutí náhlého intenzivního úniku

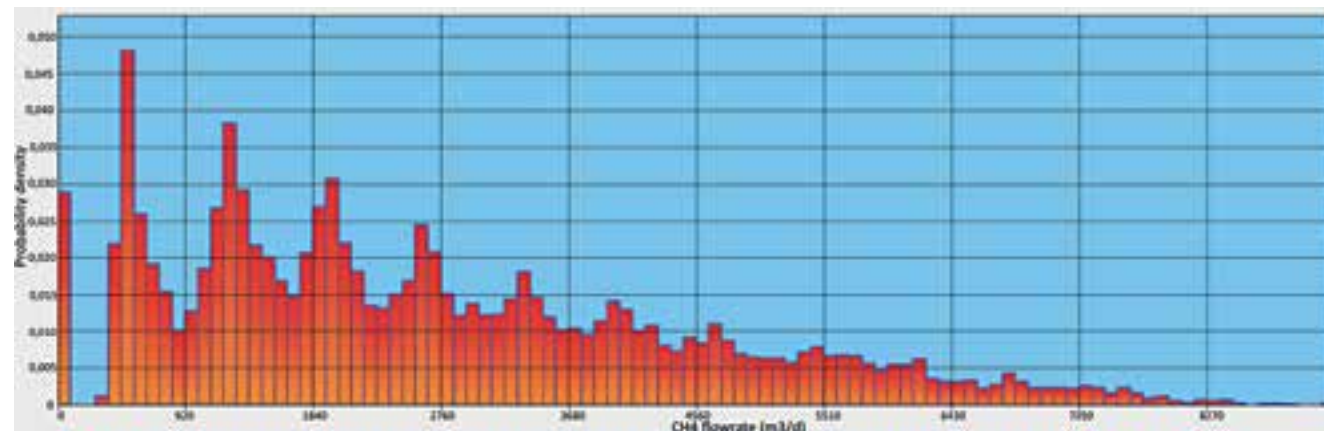
uhlovodíků se pohybuje mezi 0,5 a 5 dny, lze nicméně předpokládat, že zvládnutí v případě CO₂ by mohlo trvat déle, protože dnes známé techniky zvládnutí náhlých úniků jsou vypracovány především pro ropné a plynové vrty.

Za předpokladu výše uvedených hodnot rychlosti náhlých intenzivních úniků a jejich trvání by se množství uvolněné látky pohybovalo v rozmezí 25–1 000 m³ v případě ropy, 1 300–47 000 m³ (1–33,5 t) v případě CH₄ a 1 100–38 000 m³ (2–76,7 t) v případě CO₂.

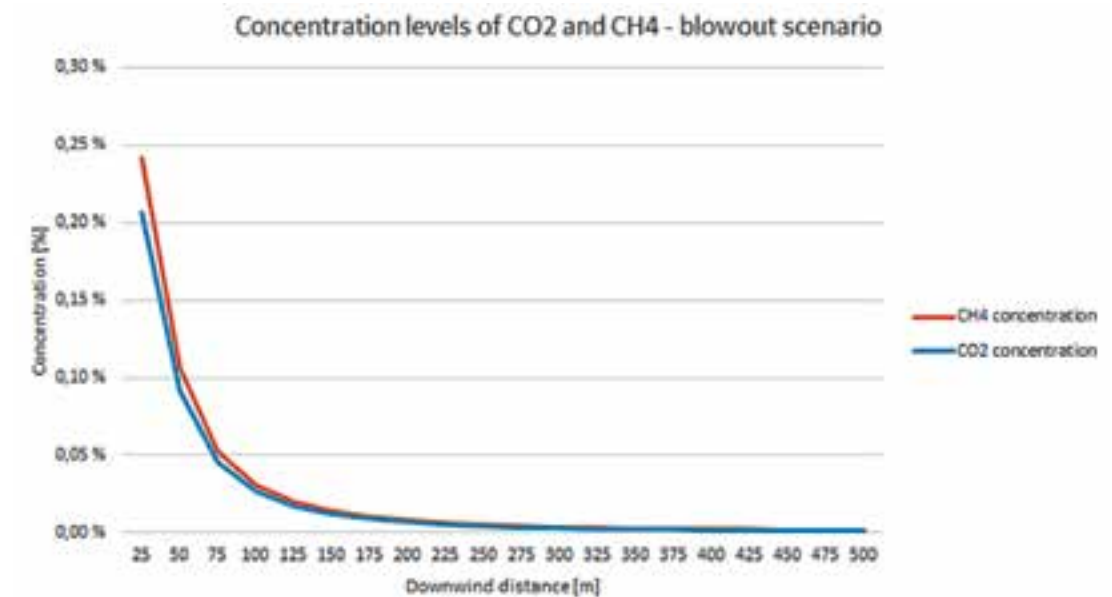
Chování CO₂ a jeho postinjektační reakce s ropou v úložišti jsou nicméně zdrojem nejistoty, jež by měla být zohledněna. Předchozí údaje vycházejí z předpokladu, že CO₂ se po uložení rozpustí v ropě a po uvolnění během náhlého intenzivního úniku se opět oddělí. Pokud by náhlý únik CO₂ probíhal spíše jako náhlý únik z úložiště nasyceného plynem, byla by rychlost uvolňování alespoň po určitou kratší dobu výrazně vyšší nežli v případě úniku z prostředí nasyceného ropou. Odhady založené na modelech vytěžitelnosti plynu při použití PVT (tlak–objem–teplota) vlastností CO₂ a dostupných charakteristik rezervoáru naznačují teoretický potenciál až 1,1 milionu m³/den. Tento potenciál je řádově podobný odhadům uvolnění CH₄ při náhlém úniku z vrtu Br-64 v minulosti, tzn. přibližně 1,8 milionu m³/den. I zde platí, že skutečný potenciál by silně závisel na množství CO₂ injektovaného v okamžiku náhlého úniku a rychlosti poklesu tlaku v rezervoáru v důsledku uvolňování plynu.

Posouzení následků

Hlavní rizika pro zdraví lidí pramení z náhlého a prudkého úniku CO₂ nebo CH₄, který může způsobit vážné zranění nebo smrt pracovníků v místě injektáže. Kromě posuzovaných scénářů úniku existují též další zdroje rizik související s provozem injektážního zařízení, například uchování plynů či tekutin ve stlačeném stavu, riziko výbuchu nebo využívání těžkých strojů. Lze předpokládat, že i pro injektážní místa na ložisku LBr-1 by v tomto ohledu pravděpodobně byla relevantní statistická míra fatality ve výši 10⁻³ na lokalitu a rok.



Obr. 5-5 Potenciální množství uvolněného plynu (CH₄) v případě náhlého úniku z aktivního vrtu při výronu z oblasti nasycené ropou.



Obr. 5-6 Rozptyl CO₂ a CH₄ v případě náhlého intenzivního úniku o objemu 6 700 kg/den (CH₄) a 15 300 kg/den (CO₂). Na vodorovné ose je vzdálenost od místa úniku směrem po větru v metrech; na svislé ose koncentrace plynu v %.

Jiné nežli náhlé úniky mohou zdravotní riziko znamenat pouze v případě, že by došlo k nahromadění CO₂ či CH₄ v uzavřeném prostoru a následnému vystavení osob účinkům těchto plynů. Riziko pro lidské zdraví mimo bezprostřední okolí injektážního místa je prakticky zanedbatelné, neboť uvolňující se CO₂ i CH₄ by se rozptýlil do atmosféry v nízkých koncentracích pod prahem škodlivosti pro lidi. Žádná forma úniku, ani náhlé a prudké uvolnění, by pak s největší pravděpodobností nepředstavovala riziko pro Lanžhot jako nejbližší sídelní útvar.

Křivka rozptylu CO₂ za předpokladu scénáře náhlého intenzivního úniku je uvedena na obr. 5-6.

Při únicích tohoto rozsahu by výstup plynů na povrchu neměl žádný vliv na zdraví lidí ani životní prostředí v důsledku nebezpečných koncentrací; koncentrace obou plynů by se udržely pod hladinou 0,25%. Na tomto místě je však třeba zdůraznit, že zde uvažované scénáře vycházejí pouze z předpokladů pro pilotní projekt a že u hodnot množství unikajícího CO₂ panuje určitá nejistota (viz projektový výstup V4.2).

Pro dosažení nebezpečné koncentrace například ve vzdálenosti 25 metrů po větru od zdroje by objem unikajícího plynu musel dosahovat zhruba hodnot 400 t/den v případě CO₂, resp. 1 200 t/den v případě CH₄.

Likvidace případného náhlého úniku plynů by mohla být značně nákladnou záležitostí. Historická data v této souvislosti ukazují, že náklady na likvidaci náhlého úniku se pohybují v rozmezí 50–90 mil. USD i více a náklady na sanaci úniků z vrtů mohou dosáhnout až 4,5 mil. USD na vrt (v prostředí NCS).

V souvislosti s možností úniku plynů z likvidovaných vrtů byly vzhledem ke své poloze jako pro životní prostředí rizikovější identifikovány následující vrty:

- vrty v území evropsky významné lokality a ptačí oblasti Natura 2000, resp. plošně téměř identické biosférické

rezervace UNESCO (např. Br-68, Br-71, Br-72, Br-73, Br-74, Br-75, Br-76, Br-77, Br-80 a Br-85),

- vrty nacházející se podél nadregionálního biokoridoru (Br-27 a Br-52),
- vrty nacházející se v prostoru dálkového migračního koridoru pro velké savce (Br-44, Br-59, Br-62, Br-68, Br-80).

Rizika související s dopravou

Podle zadání pilotního projektu (viz kap. 4) byly analyzovány dvě varianty dopravy CO₂. V prvním případě se jednalo o dopravu CO₂ pomocí cisteren, ve druhém pomocí potrubí.

Při dopravě CO₂ cisternami byly detailně analyzovány manipulace s CO₂ během nakládání, přepravy a vypouštění. Zjednodušeným způsobem byla analyzována trasa přepravy i vlastní zařízení sloužící k přepravě.

Při dopravě CO₂ potrubím byly stanoveny spolehlivostní charakteristiky desítek komponent a také lidské činnosti související se zajištěním bezpečné přepravy. Pro oba typy dopravy se jedná o 16 různých typů činností obsluhy.

Při dopravě potrubím byl analyzován vliv požárů a seismických událostí na spolehlivost komponent. Frekvence vzniku požáru, která ovlivňuje spolehlivost komponent, byla stanovena na 2,0 x 10⁻² za rok.

Na základě křivek porušení byla stanovena frekvence poškození technologie účinky seismicity. Frekvence poškození technologie od seismické události je 1,2 x 10⁻² za rok. Je nutné zdůraznit, že získané výsledky jsou pouze ilustrativní a platí pro hypotetickou technologii, prozatím bez konkrétních realizačních plánů.

5.4 Vyhodnocení rizik

Nejpravděpodobnější scénář úniku fluid z úložiště je únik podél likvidovaného vrtu. V době realizace projektu

nebyla většina starých likvidovaných vrtů na ložisku relikvidována moderními postupy; panuje tedy nejistota ohledně jejich integrity. Zvláštní obavy v tomto směru panují u vrtů Br-62 a Br-64, u nichž v 60. letech minulého století došlo k náhlým únikům (erupcím). Některé likvidované vrty též nesplňují nové předpisy na utěsnění a jiné je splňují pouze s obtížemi.

Rizikovým scénářem s nejméně závažnými následky je náhlý intenzivní únik během výstavby nebo provozu injektážního nebo monitorovacího vrtu. Takováto událost by potenciálně mohla mít vážné až fatální následky ve všech zvažovaných ohledech. Zároveň však platí, že pravděpodobnost takového scénáře je statisticky poměrně nízká (< 10⁻⁴), v případě ložiska LBr-1 pak nejspíše ještě nižší, neboť ložisko je dobře prozkoumáno a zmapováno. Výskyt nepředvídaných událostí však pochopitelně zcela vyloučit nelze.

Provedené simulace úniků skrze cementové mostky likvidovaných vrtů ukazují velmi nízké hodnoty průtoku. Aby byl efekt skutečně znatelný, muselo by dojít ke značnému porušení mostků nebo spojů tak, aby vznikl volný prostor umožňující proudění. Vzhledem k pojetí hlavních bariér vrtu (pažení, cementový mostek, zapažnicová cementace), kde např. u relikvidovaných vrtů byl zacementován téměř celý stvol vrtu (celá délka vrtu), by následky úniku byly nevýznamné. Simulace rovněž naznačují, že pozitivních výsledků a posunu stavu vrtu z běžného do dobře profilovaného stavu lze dosáhnout snížením propustnosti cementu (např. při relikvidaci). Toto opatření má pravděpodobně větší efekt nežli zvětšování mocnosti cementových mostků. Na druhé straně mostky o menší mocnosti by byly náchylnější např. vůči degradaci cementu.

Další zvažované scénáře úniku se nejvíce jeví jako příliš pravděpodobné, ani nepředstavují riziko významných následků. Těsnicí vlastnosti krycí horniny byly dostatečně ověřeny během doby produktivní těžby ložiska; nebyly zjištěny ani žádné pravděpodobné scénáře úniku podél zlomů, jež bez výjimky končí hluboko pod povrchem a těsní. Úniky u takovýchto scénářů by nejspíše znamenaly rychlost uvolňování CO₂ nižší nežli rychlost respirace půdou.

Co se týče způsobu likvidace vrtů na ložisku LBr-1, byly podle dostupných informací všechny vrty vystrojeny perforovaným pažením. Více než polovina vrtů splňuje dnešní požadavky na izolaci podle příslušných předpisů jak co do mocnosti cementového mostku, tak i požadavku úplného utěsnění perforací (obr. 5-7). Zároveň však platí, že u 13 % zkoumaných vrtů nebyl k dispozici dostatek dokumentace pro posouzení jejich stavu, tudíž mohou a nemusí splňovat platné požadavky. Zhruba 30 % vrtů předpisy nesplňuje – dva z těchto případů jsou navíc poněkud překvapivě vrty relikvidované (Br-54 a Br-71). Tato skutečnost může být důsledkem změny předpisů oproti datu relikvidace, případně odlišné interpretace parametrů nutných pro splnění požadavků. Ostatní nevyhovující vrty mají nedostatečnou mocnost mostků (Br-62, Br-73, Br-85 a Br-89), zůstaly unich neutěsněné některé perforace (Br-27, Br-55, Br-78, Br-81 a Br-86) nebo se jedná o kombinaci obou případů (Br-45, Br-60, Br-61 a Br-65).

Na základě posouzení dokumentace likvidovaných vrtů se doporučuje relikvidace všech vrtů, které nesplňují platná izolační kritéria, plus vrtu Br-64, jenž by měl být relikvidován s ohledem na to, že u něj v minulosti došlo ke třem náhlým únikům. Rovněž by měl být vy-



Obr. 5-7
Přehled výsledků analýzy integrity likvidovaných vrtů na lokalitě LBr-1 (porovnání s platnou legislativou).

jasněn stav vrtů, pro které aktuálně není k dispozici potřebná dokumentace.

Při hodnocení rizik souvisejících s dopravou byly hodnoceny dvě kategorie. Jedna související s ekonomickými následky (riziky), které vyplývají z přerušení činnosti technologie v důsledku poruchy zařízení a znemožnění plnění projektované funkce. Druhá kategorie souvisí s rizikem ohrožení zdraví obyvatelstva v důsledku úniku CO₂ během transportu. Pro oba způsoby dopravy a obě kategorie hodnocených rizik bylo vytvořeno několik scénářů. Pro vyjádření rizik spojených s dopravou CO₂ z místa zdroje do místa ukládání byla vytvořena matice rizika, ve které jsou uvedeny pravděpodobnosti a důsledky pro každý uvažovaný scénář.

Z matice rizika vyplývá, že všechny uvažované scénáře jsou v akceptovatelné oblasti, a to i přesto, že mnohé přijaté předpoklady jsou značně konzervativní. Největší

následky by mohly vzniknout při dopravě cisternou a její katastrofické havárii v hustě osídlených oblastech. Nicméně frekvence vzniku této události je vzácná. Z výsledných hodnot rovněž vyplývá, že vliv na zdraví v důsledku úniku CO₂ z technologií na trase od místa vzniku do místa uložení (vrt) vykazuje téměř shodnou frekvenci vzniku pro oba typy transportu CO₂ (transport automobilovou cisternou, transport potrubím).

Porovnání ekonomických rizik a rizik vlivu na zdraví mezi oběma způsoby dopravy není možné provést zcela jednoduše, protože oba typy dopravy jsou dimenzovány na zcela jiná přepravovaná množství. Bez uvažování těchto rozdílů vychází riziko při dopravě cisternami lépe (ca 8x), nicméně roční dopravovaná množství se liší o více než dva řády. Pokud by se riziko vztáhlo hypoteticky na přepravenou tunu CO₂, pak by potrubní varianta byla více než o jeden řád rizikově bezpečnější.

LITERATURA

CO2CARE (2012): CO₂ Site Closure Assessment Research, Deliverable D2.5: Report on Analytical Computation of Leakage on a Cement Plug, February 2012.

ISO (2009): ISO 31000:2009 – Risk Management – Principles and Guidelines.

SEZNAM VÝSTUPŮ AKTIVITY 4

V4.1 Zpráva – výsledky identifikace rizik

V4.2 Zpráva – výsledky analýzy rizik

V4.3 Závěrečná zpráva o hodnocení rizik

6. Monitoring

Monitoring byl náplní Aktivita 5. Jejím hlavním cílem bylo připravit plán monitorování úložiště ve smyslu § 9 zákona č. 85/2012 o ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur. Práce sestávaly ze tří hlavních částí:

- analýzy použitelnosti jednotlivých monitorovacích metod,
- provedení základní etapy monitoringu úložiště (tzv. *baseline monitoring*) zahrnující posouzení existujících dat a realizaci terénních monitorovacích měření třemi vybranými metodami (seismologie, atmogeochemie, gravimetrie),
- sestavení vlastního monitorovacího plánu úložiště LBr-1.

Pro sestavení monitorovacího plánu byly využity také informace z geografické a pedologické charakteristiky lokality (Aktivita 1), výsledky statického a dynamického modelování úložiště (Aktivity 2 a 3) a výsledky analýzy rizik (Aktivita 4).

6.1 Analýza použitelnosti jednotlivých monitorovacích metod

Monitoring úložiště oxidu uhličitého je jedním ze základních předpokladů pro zajištění bezpečnosti jeho provozu (včetně etapy následující po ukončení ukládání). Stěžejním bodem při přípravě těchto činností je sestavení monitorovacího plánu lokality. Tento plán musí být založen na monitorovacích metodách, které jsou osvědčené v době přípravy projektu a které odpovídají požadavkům jednotlivých etap prací na úložišti. Monitoringem jsou pořizována data o parametrech charakterizujících chování úložné struktury přinášející údaje, které jsou nejen vstupem pro sestavení statického geologického modelu úložiště, ale které zároveň slouží k popisu dynamického chování úložiště a k provádění analýzy možných rizik.

Legislativní rámec pro ukládání oxidu uhličitého tvoří tyto normy:

- zákon č. 85/2012 Sb., o ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur a o změně některých zákonů (transpozice směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2009/31/ES ze dne 23. dubna 2009, o geologickém ukládání oxidu uhličitého),
- zákon o geologických pracích č. 62/1988 Sb.

Podle požadavků zákona č. 85/2012 Sb. je nutné v rámci monitoringu rizik věnovat zvýšenou pozornost potenciálním migračním cestám a objektům, které mají být chráněny. Jedná se zejména o místa potenciálních úniků, trhliny a zlomy, oslabená místa nebo prostory v hornině nebo ve vrtech.

K problematice monitorování uvádí §9 zákona 85/2012 Sb. následující:

(1) *Provozovatel je povinen provádět monitorování vtláčečích zařízení, úložného komplexu a podle potřeby okolního životního prostředí za účelem:*

- a) porovnání skutečného chování oxidu uhličitého a vody přítomné v úložišti s chováním předpokládaným v závěrečné zprávě zpracované podle zákona č. 62/1988 Sb., o geologických pracích, ve znění pozdějších předpisů,*
- b) zjištění závažných nesrovnalostí,*
- c) zjištění pohybu oxidu uhličitého,*
- d) zjištění případného úniku oxidu uhličitého a jeho objemu*
- e) zjištění případných významných nežádoucích účinků na okolní prostředí, zejména na pitnou vodu, obyvatelstvo nebo uživatele okolní biosféry,*
- f) posouzení účinnosti nápravných opatření,*
- g) aktualizace posouzení bezpečnosti a neporušenosti úložného komplexu z krátkodobého a dlouhodobého hlediska, včetně posouzení toho, zda bude uložený oxid uhličitý zcela a trvale zadržen.*

(2) *Provozovatel provádí monitorování podle plánu monitorování. Kritéria pro vypracování a aktualizaci plánu monitorování a pro monitorování po uzavření jsou stanovena v příloze k tomuto zákonu.*

(3) *Provozovatel je povinen aktualizovat plán monitorování minimálně jednou za 5 let. Provozovatel při tom zohlední změny týkající se posouzení rizika úniku, změny týkající se posouzení rizik pro životní prostředí a lidské zdraví, nové vědecké poznatky a dosažený pokrok v nejlepších dostupných technologiích. Aktualizovaný plán monitorování předkládá provozovatel obvodnímu báňskému úřadu se žádostí o změnu povolení provozu úložiště oxidu uhličitého.*

(4) *Monitorováním podle tohoto zákona nejsou dotčeny povinnosti zjišťovat, vykazovat a ověřovat množství emisí skleníkových plynů podle zákon č. 383/2012 Sb., o podmínkách obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů.*

Z hlediska časové posloupnosti se vylučují tyto monitorovací etapy:

- itoring) před vlastním zahájením vtláčení a ukládání CO₂ do struktury úložiště – slouží k získání komplexního obrazu o základních geologických a environmentálních charakteristikách,
- průběžné operativní monitorování během etapy ukládání – slouží k zabezpečení bezproblémového procesu ukládání CO₂ a pomáhá včas zabránit jakýmkoli nežádoucím situacím; umožňuje opakovaně průběžně porovnávat změny stavu úložiště a předvídat případně jeho další chování,
- závěrečné monitorování při ukončení etapy ukládání,
- následné monitorování s časovým odstupem po ukončení ukládání CO₂ – má zajišťovat kontrolu nad tím, že systém se chová předpokládaným způsobem, a to i do budoucna.

V rámci analýzy použitelnosti jednotlivých monitorovacích metod byla nejprve provedena rešerše mezinárodní odborné literatury se zaměřením na metody monitoringu úložišť CO₂ a kritéria jejich použitelnosti. Byly prostudovány jak metody povrchové, tak metody založené na měření ve vrtech, s hloubkovým dosahem od povrchu až po hloubkový horizont vlastního úložiště. Volba monitorovacích metod vychází z povinnosti potenciálního provozovatele úložiště porovnávat skutečné chování oxidu uhličitého a vody přítomné v úložišti s chováním předpokládaným, zjišťovat závažné nesrovnalosti v chování úložiště, zjišťovat pohyb oxidu uhličitého a zjišťovat případný únik oxidu uhličitého a jeho objemu.

Na základě porovnání parametrů a detekčních schopností jednotlivých metod s konkrétními podmínkami na připravovaném pilotním úložišti LBr-1 byla sestavena matice použitelnosti konkrétních monitorovacích metod. Při sestavování této matice byly využity poznatky z mezinárodních výzkumných programů a projektů (např. IEAGHG 2004, Rütters et al. 2014), a také podpůrné dokumenty k implementaci evropské směrnice

č. 2009/31/ES, vydané Evropskou komisí (Association ASPEN 2009, EC 2011). Zásadní význam pro sestavení matice monitorovacích metod pro úložiště LBr-1 měl programový nástroj „Interactive Design of Monitoring Programmes for the Geological Storage of CO₂“, zpracovaný Britskou geologickou službou (BGS) pro IEA Greenhouse Gas R&D Programme (<http://ieaghg.org/ccs-resources/monitoring-selection-tool1>).

Výsledná matice je uvedena v tab. 6-1. Jako velmi vhodné se ukázaly být některé geofyzikální metody, a to jak povrchové (seismická měření liniiová – 2D i plošná – 3D), tak i geofyzikální měření ve vrtech (karotážní měření), nebo měření mezi vrty (seismická tomografie). Průběžné měření teploty a tlaku a pH ve vrtech patří k obvyklým metodám a bývá často rovněž řazeno do kategorie karotážních měření. Vhodnými metodami je jeví také použití „stopovačů“ (tracerů), tj. kontrastní látky, která umožní sledování migrace CO₂ i sledování integrity krycí horniny, dále pak atmogeochemie – měření koncentrace vybraných plynů v půdním vzduchu, monitoring mikroseismů i povrchová či vrtní gravimetrie.

Metody	Cíl monitorování					
	oblak CO ₂	integrita krycí horniny	únik CO ₂	migrace mimo úložiště	kvantifikace	seismičita
4D (opakovaná 3D) seismika	xxx	xxx	x	xxx	xxx	
2D seismika	xx	xx	x	xx	xx	
seismika mezi vrty (tomografie)	xxx	x		x	xxx	
vrtná seismika (VSP)	xx	x		x	xx	
vícesložková seismika	xxx	xxx		xxx	xxx	xx
stopovače (tracery)	x	xxx	xxx	xxx	x	
karotážní měření	x	xxxx		xxx	xxx	
měření tlaku ve vrtu	x	xxx		x	xxx	xxx
měření teploty ve vrtu	x	xxx		x	xxx	xxx
chemismus fluid ve vrtu	x	xx	xxx	xx	xx	
měření pH ve vrtu	x		xx	xx	xx	
monitoring mikroseismů	x	x				xx
povrchová gravimetrie				xx	xx	
měření koncentrace půdních plynů		x	xx		x	x
inSAR (satelitní interferometr)		x				x
infračervený laser			x			
Eddy kovariance (atmosf. CO ₂)		x	x			
infračervený analyzátor plynů		x	x			
povrchový tok plynů		x	x			
letecká spektrometrie (chlorofyl)		x	x			
geochemie fluid			x			
mikrobiologický monitoring			x			
sklonoměr (tiltmeter)						x

Tab. 6-1 Matice použitelnosti monitorovacích metod na Lokalitě LBr-1 – metody jsou seřazeny shora dolů podle významnosti pro lokální monitorovací plán.

6.2 Základní etapa monitoringu úložiště

Práce na základní etapě monitoringu úložiště LBr-1 spočívaly jednak v posouzení a využití již existujících dat získaných a zpracovaných v rámci Aktivit 1–4, jednak v provedení nových terénních monitorovacích měření uskutečněných na lokalitě i v jejím okolí v letech 2015–2016 třemi vybranými metodami. Jednalo se o:

- seismologický monitoring,
- atmogeochemický monitoring,
- gravimetrický monitoring.

Seismologický monitoring

Cílem základní etapy seismologického monitoringu bylo posouzení ohrožení integrity úložiště a doprovodné infrastruktury silnějším zemětřesením v blízkosti lokality. Práce, které uskutečnil ÚFZ sestávaly z ověření podmínek pro seismologická měření na celkem 11 místech, pořízení několikaměsíčního kontinuálního záznamu seismického signálu na měřících bodech v blízkosti pilotní lokality LBr-1 (stanice LANA a RADA – viz níže) a zpracování a interpretace naměřených dat.

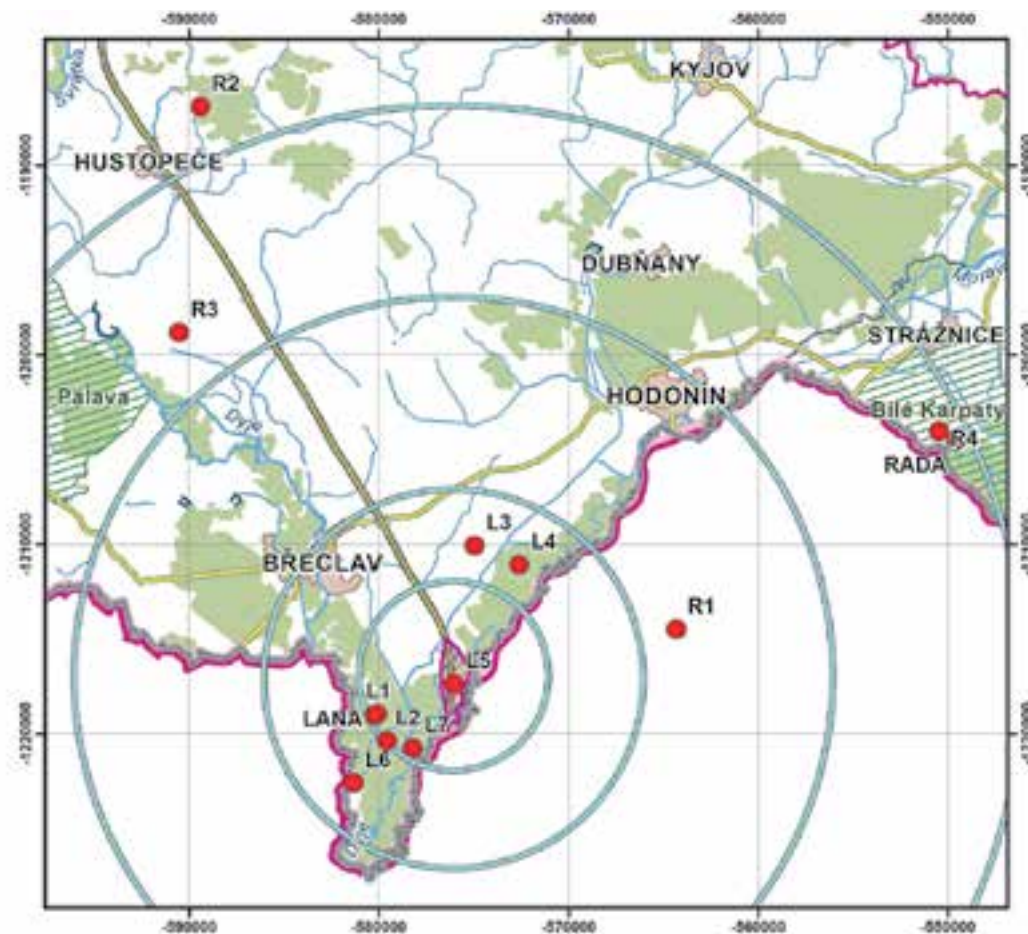
Pro ověření seismologických podmínek v oblasti lokality a jejího okolí byla provedena série krátkých měření seismického šumu na 11 různých místech s cílem

zdokumentovat možnosti pro měření a vybrat vhodné měřící body. Měření probíhalo ve dvou okruzích kolem centra modelové lokality LBr-1, v užším okruhu do 10 km a v širším okruhu (obr. 6-1). Úkolem měření v užším okruhu, označených L1 až L7, bylo ověřit podmínky pro realizaci seismologických měření v různých částech modelové lokality.

Úkolem měření v širším okruhu, označených R1 až R4, bylo vyhledání míst s výhodnějšími seismogeologickými podmínkami pro registraci seismických jevů, a to i za cenu větší vzdálenosti od modelové lokality. Měření bylo provedeno seismologickými registračními aparaturami Quanterra Q330 a RefTek 130 s tříšložkovými seismometry Sensor PE-6, Lennartz Le-1-3D lite a Geosig VE-53. Pro umístění snímače byla vždy odstraněna svrchní část ornice, v případě potřeby s dalším výkopem do hloubky až 60 cm. Snímač byl ustaven na dně výkopu s orientací podle kompasu a zpravidla zasypán.

K dlouhodobému kontinuálnímu monitorování seismicity v okolí pilotní lokality LBr-1 byly využity (vedle stálých existujících stanic seismologických pozorovacích sítí v regionu) dva nově zbudované lokální seismologické měřící body – LANA a RADA (obr. 6-1). Účelem měření na těchto stanicích mělo být zvýšení detekční

Obr. 6-1 Situace lokalit, kde byla provedena měření seismického šumu, a měřících bodů LANA a RADA.



schopnosti a dosažení lepších podmínek pro lokaci ohniska případného seismického jevu, zejména jeho hloubky.

V zájmovém území LBr-1 jsou obecně špatné podmínky pro seismologická měření, které zapříčiňují nízkou detekční schopnost měřícího bodu LANA, proto byl měřící bod RADA instalován mimo tuto lokalitu, v místě, kde jsou poněkud lepší podmínky pro měření.

Monitorování s kontinuálním záznamem seismického signálu probíhalo po dobu 6 měsíců od 15. 4. 2015 do 9. 9. 2015 na bodě LANA a od 4. 8. 2015 do 16. 10. 2015 na bodě RADA. Pro instalaci měřících bodů byly využity betonové skruže s betonovým uzamčeným poklopem (obr. 6-2). Seismometry byly orientovány a ustaveny na dně výkopů po odstranění svrchních půdních horizontů a zasypány.

Ze zpracování provedených měření vyplývá, že podmínky pro seismologická pozorování v lokalitě LBr-1 jsou komplikované zejména z následujících důvodů:

1. Vysoká úroveň civilizačního rušení. Lokalitou prochází trasa dálnice, železnice a tranzitního plynovodu. Území je hustě osídlené a hospodářsky využíváno.
2. Sedimentární výplň vídeňské pánve představuje prostředí složitého šíření seismických vln. Pasivní seismická pozorování komplikuje kontrastní průběh seismických parametrů sedimentárních hornin. V důsledku toho může docházet k obtížně popsatelným jevům jako je rozptyl a reverberace seismických vln.
3. Na málo zpevněné sedimenty při povrchu, zejména na kvartér údolní nivy, se váže složitý komplex poruchových vln různého původu (v úvahu přichází několik typů povrchových vln, frekvenčně závislý amplifikační efekt, disperze seismických vln aj.), které ztěžují čitelnost seismického záznamu. Poruchové vlny vázané na povrch vykazují značnou amplitudu.
4. Není k dispozici dostatek experimentálních dat pro odvození přesnějších údajů např. o útlumu seismických vln, rychlostech seismických vln ve větších hloubkách, prostupu seismických vln mezi sedimentární výplní a podloží pánve a šíření příčných vln v málo zpevněných zvodněných sedimentech.

Pro spolehlivé monitorování slabších seismických jevů je proto potřeba uvažovat o použití pokročilej-

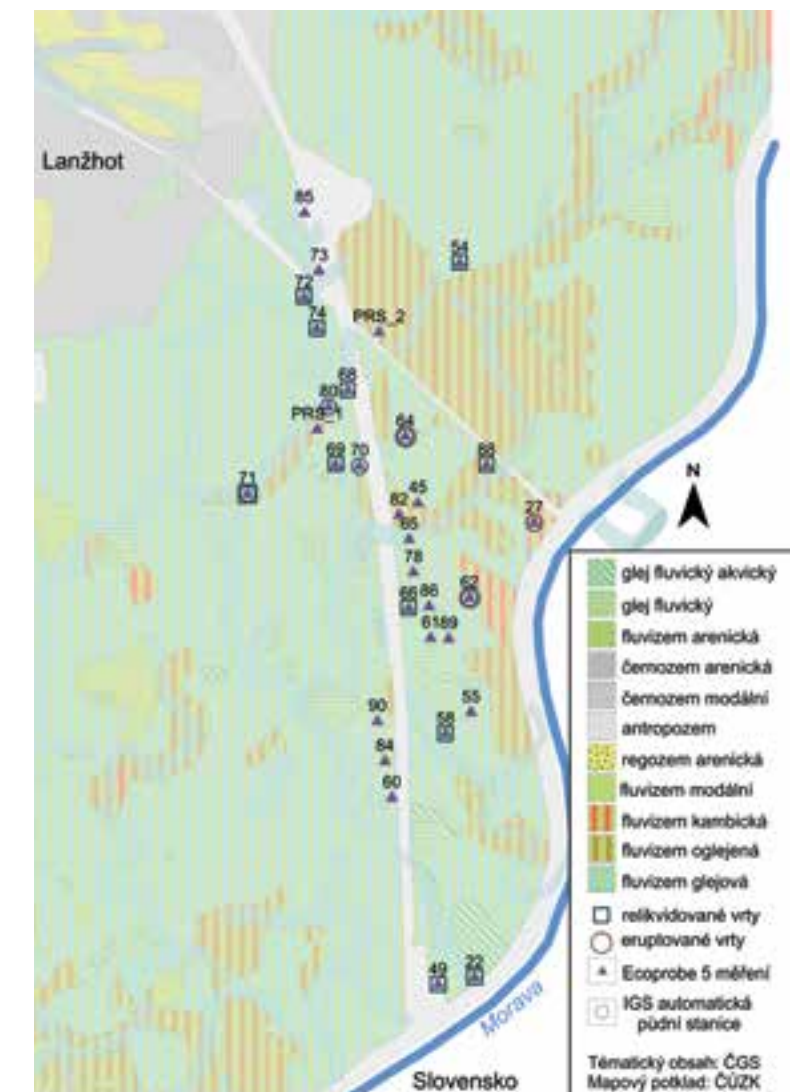
ších metod mikroseismického monitoringu ve vrtných a mnohokanálových variantách. V komplikovaných podmínkách modelové lokality LBr-1 nelze dosáhnout lepší citlivosti jednoduchým způsobem seismologického monitoringu s použitím jen několika jednotlivých snímačů rozmístěných na povrchu kolem sledovaného objektu.

Atmogeochemický monitoring

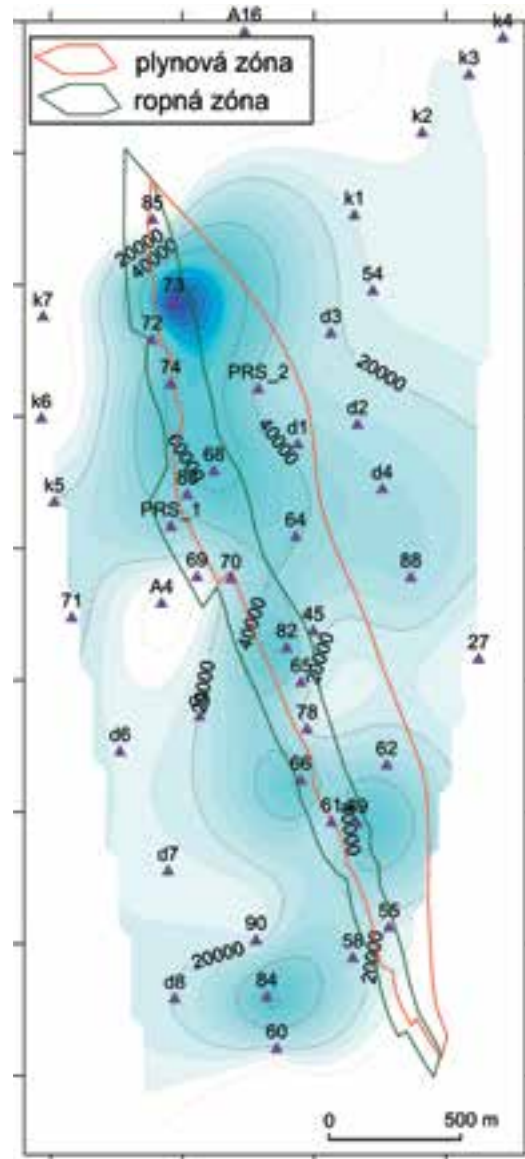
V rámci atmogeochemického monitoringu v období 2015–2016 prováděli pracovníci ČGS na 31 místech lokality LBr-1 terénní měření CO₂ a metanu pomocí přenosného přístroje Ecoprobe 5. V období od března do října 2016 pak bylo na 4 vybraných místech prováděno i kontinuální měření automatickými stanicemi IGS s intervalem vzorkování 1 hod. Poloha měřících stanic je vynesena v mapě půdních typů na obr. 6-3. Z hodnot naměřených pomocí Ecoprobe 5 byla s použitím programu Surfer sestrojena mapa izolinií obsahu oxidu uhličitého v půdním vzduchu – viz obr. 6-4.

< Obr. 6-2 Instalace měřícího bodu RADA v betonové skruži.

Obr. 6-3 Mapa půdních typů s lokalitami atmogeochemického měření pomocí přenosného přístroje Ecoprobe 5 a měřícími stanovišti stacionárních automatických stanic IGS.



Obr. 6-4 Mapa izolinií obsahu CO₂ v půdním vzduchu v období červen–srpen 2016. Čísla lokalit odpovídají číslům zlikvidovaných vrtů Br-xx, k – kontrolní vrty, d – doplňková měření.



Výsledky měření automatických stanic byly vyhodnoceny formou časových řad. Na obr. 6-5 jsou znázorněny obsahy CO₂ v měsících březen–listopad 2016. Vedle měřených obsahů CO₂ a metanu jsou uvedeny také teplota v půdě (měřená automatickou stanicí), teplota vzduchu, barometrický tlak ovzduší a relativní vlhlost vzduchu (údaje převzaté z meteorostanice ČHMÚ Lanžhot).

Výsledky atmogeochemického monitorování ukazují zvýšené obsahy CO₂ (40 000–70 000 ppm) v letních měsících, a to v lokalitách nad ložiskem ropy a zónou nadhydrostatických tlaků plynu (Br-62 a Br-64). Naopak v chladném období tvorba mikrobiálního CO₂ klesá obsah na úroveň stovek až prvních tisíců ppm.

Dosažené výsledky potvrzují, že při atmogeochemickém monitoringu je nezbytné věnovat velkou pozornost správnému stanovení výchozího stavu (baseline). Je při tom třeba brát v úvahu jak denní a sezónní variace obsahu CO₂ v půdním vzduchu, tak i změny late-

rální, související se situací měřících stanic. Metodické aspekty atmogeochemického monitoringu byly řešeny v rámci metodického výzkumu v Aktivitě 7 (viz kap. 8.4).

Gravimetrický monitoring

Předmětem gravimetrického monitorování je detekování lokálních časových variací hustot hornin nebo fluid ve svrchních částech zemské kůry opakovaným měřeními tíhového zrychlení, které je odrazem distribuce hmot v Zemi. Tímto měřením lze obecně indikovat také gravitační účinek CO₂ injektovaného do podzemního úložiště. Rozhodujícími faktory jsou hustota nádržních hornin, hloubka úložiště a jeho velikost (kapacita), množství uloženého CO₂, a také tlakově-teplotní podmínky v úložné struktuře.

Gravimetrické monitorování spočívá v opakovaném měření tíhového zrychlení na pozorovacích stanicích, která jsou situována nad úložnou strukturou. V rámci základního monitoringu (před injektáží CO₂ do úložiště LBr-1), může být tíhové zrychlení ovlivňováno pouze sezónními hydrologickými vlivy, k nimž patří sezónní atmosférické srážkové úhrny, kolísání hladiny podzemní vody a změny obsahu půdní pórové vody v horninách, které se nacházejí nad hladinou podzemní vody.

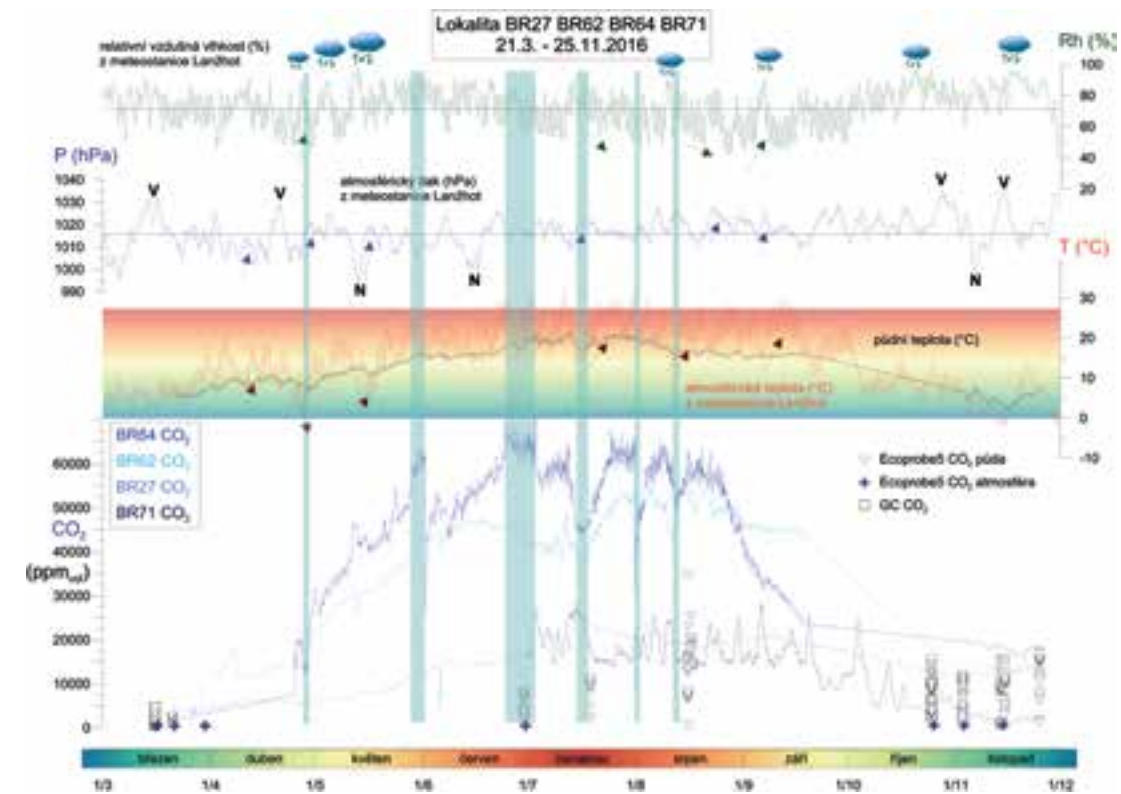
V oblasti pilotní struktury LBr-1 bylo nad úložnou strukturou pracovníky partnera Miligal situováno a pomocí geohřebů stabilizováno celkem 204 gravimetrických stanic (obr. 66). Souřadnice stanic byly určeny pomocí GPS, nadmořská výška stanic byla změněna geometrickou nivelací. Na těchto stanicích bylo realizováno opakované měření tíhového zrychlení digitálním gravimetrem Scintex Autograv CG-5. Monitorovací gravimetrické měření se uskutečnilo v období 11.–22. dubna 2016 a poté znovu v období 19.–26. září 2016. Cílem bylo zjistit případné dílčí variace tíhového zrychlení vyvolané sezónními hydrologickými vlivy.

Přesnost měření tíhového zrychlení může být negativně ovlivněna několika vlivy:

- rušivými účinky pocházejícími z blízkých topografických hmot (tento vliv je v rovinaté zájmové oblasti zanedbatelný),
- vibracemi a otřesy (zájmová lokalita je poměrně nepříznivě ovlivňována provozem na dálnici Brno–Břeclav–Bratislava, která probíhá přímo nad pilotním úložištěm LBr-1),
- nedokonalou stabilizací tíhových stanic (část měřících stanic na LBr-1 byla vytyčena na nebezpečných lesních cestách a poškozena činností těžké lesní techniky).

Díky dvěma posledním vlivům dosáhla střední chyba tíhových měření hodnot 0,008 mGal v dubnu 2016 a 0,005 mGal v září 2016, což nedovolilo spolehlivě určit účinek sezónních hydrogeologických vlivů.

Ukázalo se, že gravimetrický monitoring na lokalitě LBr-1 je díky rušivým vlivům realizovatelný pouze s obtížemi. Povrchová měření by bylo žádoucí provádět



Obr. 6-5 Časová závislost obsahu CO₂ v půdním vzduchu v období červen–listopad 2016 v lokalitách vrtů Br-62, Br-64 (nad ložiskovou akumulací plynu), Br-27 a Br-71 (mimo ložisko).

pouze na vybraných pevně zbudovaných stanicích, což by ovšem vyžadovalo provádění stavebních prací (kupříkladu Zeměměřický úřad provádí stabilizaci operních gravimetrických bodů do země zapuštěným pilířem tvaru čtyřbokého komolého jehlanu, který je zděný z lomového kamene a cementové malty). Na zájmové

lokalitě pilotního úložiště LBr-1 by byla potřeba zbudovat alespoň 5 monitorovacích stabilizovaných gravimetrických stanic přímo nad úložištěm a dalších 5 stanic mimo úložiště, ve vzdálenosti cca 2–3 km.

Vzhledem k poměrně malému množství uloženého CO₂, které se předpokládá v rámci základního scénáře pilotního projektu, a s přihlédnutím k hloubce ukládání zhruba 1000 m pod povrchem, je očekávaný záporný tíhový účinek injektovaného CO₂ velmi malý. Je proto nejisté, zda jej bude možno gravimetrickým monitorováním na povrchu spolehlivě indikovat. Použitelné výsledky by tak pravděpodobně mohl přinést spíše gravimetrický monitoring prováděný ve speciální vrtné variantě – gravimetrické měření prováděné ve vrtu.



< Obr. 6-6 Situace gravimetrických monitorovacích stanic.

6.3 Monitorovací plán úložiště

Sestavení Monitorovacího plánu úložné lokality je nezbytným předpokladem pro vybudování, provozování a následně bezpečné uzavření úložiště oxidu uhličitého. Monitorováním jsou pořizována data o parametrech charakterizujících úložnou strukturu i změny jejího chování v čase, která zároveň přinášejí podklady k analýze možných rizik spojených s ukládáním CO₂.

Z hlediska časové posloupnosti představuje první fázi monitorování základní (baseline) monitoring, který se uskutečňuje před vlastním zahájením vtláčení a ukládání CO₂ do struktury úložiště a který slouží k získání komplexního obrazu o geologických a environmentálních atributech úložné lokality. Následující fázi je mo-

nitorování úložiště během vlastní procesu injektáže a ukládání CO₂, třetí fází je monitoring v okamžiku uzavření úložiště a konečně čtvrtou fází monitoringu provádí provozovatel po dobu 20 let po uzavření úložiště (poté lze za předpokladu splnění všech zákonných podmínek předat povinnosti související s monitorováním a s prováděním nápravných opatření na obvodní báňský úřad).

Na základě požadavků kladených na monitoring úložiště platnou legislativou a po zohlednění výsledků získaných v rámci aktivit projektu REPP-CO₂ bylo v Monitorovacím plánu navrženo využití níže uvedených monitorovacích metod a sledování těchto parametrů:

1/ Měření ve vrtech

Injektážní vrt:

- prchavé emise CO₂ z vtláčecího zařízení,
- objemový tok CO₂ v ústí vtláčecího vrtu,
- tlak a teplota CO₂ v ústí vrtu (za účelem stanovení hmotnostního průtoku),
- chemická analýza vtláčeného materiálu.

Monitorovací vrt:

- tlak a teplota v úložišti pro stanovení skupenských přeměn a stavu CO₂ (metody termometrie, Distributed Acoustic Sensing/DAS/ a Distributed temperature sensing/DTS/),
- průběh vrtu v prostoru, odklon osy vrtu od svislice (metoda inklinometrie),

- elektrický odpor kapaliny ve vrtu (metoda rezistivimetrie),
- zdánlivý měrný odpor hornin (odporová nebo indukční karotáž),
- objemová hustota, pórovitost hornin, kapalina v pórech (hustotní karotáž, neutron-neutron karotáž),
- litologické členění sedimentárních vrstev-zastoupení jílovité frakce, stupeň porušení (gama karotáž, akustická karotáž),
- vertikální seismické profilování.

2/ Měření na povrchu nad úložištěm LBr-1 a v jeho širším okolí:

- kontinuální seismologický monitoring vybraných stanovišť,
- opakovaná plošná 3D seismická měření nad úložištěm (tzv. 4D seismika),
- kontinuální atmogeochemická registrace obsahů CO₂ a CH₄ na vybraných stanovištích,
- opakovaná bodová gravimetrická měření vybraných stanovišť.

Monitorovací plán je obsahem projektového výstupu V 5.8. Obsahuje podrobný technický popis jednotlivých metod a metodiky jejich uplatnění; je rozpracován pro všechny základní fáze monitoringu.

LITERATURA

- Association ASPEN (2009): Support to the Introduction of the Enabling Legal Framework on Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS). AEA Technology plc, Didcot.
- EC (2011): Implementation of Directive 2009/31/EC on the Geological Storage of Carbon Dioxide. Guidance Document 2: Characterisation of the Storage Complex, CO₂ Stream Composition, Monitoring and Corrective Measures. European Communities, Brussels.

- IEAGHG(2004): Overview of Monitoring Requirements for Geological Storage Projects, Report No PH4/29, November 2004.
- Rütters H.–Möller I.–May F.–Flornes K.–Hladik V.–Arvanitis A.–Gülec N.–Bakiler C.–Dudu A.–Kucharic L.–Juhojuntti N.–Shogenova A.–Georgiev G. (2013): State-of-the-art of monitoring methods to evaluate storage site performance. CGS Europe Key Report, May 2013.

SEZNAM VÝSTUPŮ AKTIVITY 5

- V5.1 Zpráva o provedené analýze použitelnosti jednotlivých monitorovacích metod
- V5.2 Dílčí plán základní etapy monitoringu pro atmogeochemii a seismologii
- V5.3 Finální plán základní etapy monitoringu úložiště
- V5.4 Datový soubor s výsledky základní etapy atmogeochemického monitoringu

- V5.5 Zpráva o provedené základní etapě atmogeochemického a gravimetrického monitoringu
- V5.6 Datový soubor s výsledky základní etapy seismologického monitoringu
- V5.7 Zpráva o provedené základní etapě seismologického monitoringu
- V5.8 Monitorovací plán úložiště

7. Scénáře dalšího rozvoje úložiště a technologie CCS v oblasti

7.1 Posouzení střetů zájmů

Geologické ukládání oxidu uhličitého se řídí zákonem č. 85/2012 Sb., o ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur a o změně jiných zákonů. I když se na pilotní projekty ukládání CO₂ (uložené množství CO₂ menší než 100 000 tun) tento zákon nevztahuje, pro přípravné geologické práce (ve smyslu geologického zákona č. 62/1988 Sb.) je nutné prověřit, zda se tyto geologické práce nedotýkají zájmů chráněných zvláštními předpisy – tedy jinými zákony, vyhláškami a nařízeními vlády či ministerstev. Vyhledávání, zjišťování a řešení těchto „zájmů chráněných zvláštními právními předpisy“ je obecně nazýváno jako řešení střetu zájmů, které bylo v projektu posouzeno pro potenciální projekt geologických prací pro strukturu LBr-1 jako možného pilotního úložiště oxidu uhličitého.

Možné střety zájmů byly rozděleny do několika skupin podle typu chráněných zájmů. Do první skupiny řadíme střety s ochranou přírody (včetně lesů a zemědělské půdy), do druhé skupiny střety s ochranou vod (povrchových i podzemních), do třetí skupiny střety s ochranou nerostného bohatství a do čtvrté skupiny pak střety s ochranou liniových staveb.

Ochrana přírody

Ochrana přírody na lokalitě LBr-1 a v jejím širším okolí se velmi podrobně věnuje výstup V1.3. Celá zájmová plocha lokality LBr-1 leží v biosférické rezervaci UNESCO „Dolní Morava“, tvořené komplexem lužních lesů a luk. Z chráněných území, začleněných do soustavy Natura 2000, zasahuje do území lokality LBr-1 ptačí oblast Soutok – Tvrdonicko. Lokalita LBr-1 zasahuje dále do evropsky významné lokality soustavy Natura 2000 Soutok – Podluží (komplex lužních lesů a luk). V blízkosti lokality LBr-1 leží mokřady chráněné Ramsarskou úmluvou (Mokřady dolního Podyjí II). Kromě mezinárodně významných chráněných území se v širším okolí lokality LBr-1 nacházejí i území chráněná národní legislativou, a to Národní přírodní rezervace Ranšpurk a Cahnov – Soutok a Přírodní rezervace Stibůrkovská jezera. Tyto rezervace leží poměrně daleko od vlastní lokality LBr-1, takže při uvažovaných aktivitách souvisejících s pilotním projektem se nepočítá se vstupem ani do jejich ochranných pásem.

Ochrana vod

Z hlediska potenciálních střetů zájmů s ochranou vod je pro lokalitu LBr-1 nejdůležitější existence chráněné oblasti přirozené akumulace vod (CHOPAV) „Kvartér řeky Moravy“, do které LBr-1 zasahuje. Státní správu zde podle vodního zákona vykonávají vodoprávní úřady a Česká inspekce životního prostředí. Vodoprávními úřady jsou mj. krajské úřady, které se vyjadřují k aktivi-

tám v záplavových územích, a to i v neaktivní části záplavových území, což je případ zájmového území lokality LBr-1. Při projektování geologických prací bude nutné vyžádat si stanovisko krajského úřadu pro práce v záplavovém území a v CHOPAV.

Ochrana nerostného bohatství

Ochranou nerostného bohatství se podle horního zákona rozumí ochrana ložisek vyhrazených nerostů. Přibližně 2 km na západ od lokality LBr-1 se nachází výhradní plocha ložiska ropy a plynu „Lanzhot – sever“. Toto ložisko je v současnosti těžené v rámci dobývacího prostoru (DP) Lanzhot II. Vzhledem k malé ploše tohoto DP na povrchu (1 ha) a geologické situaci nepředpokládáme střet zájmů. Ve vzdálenosti více než 4 km od lokality LBr-1 se nachází ložisko ropy a plynu „Lanzhot“ (DP Lanzhot). Vzhledem k dostatečné vzdálenosti ani zde nepředpokládáme střet zájmů.

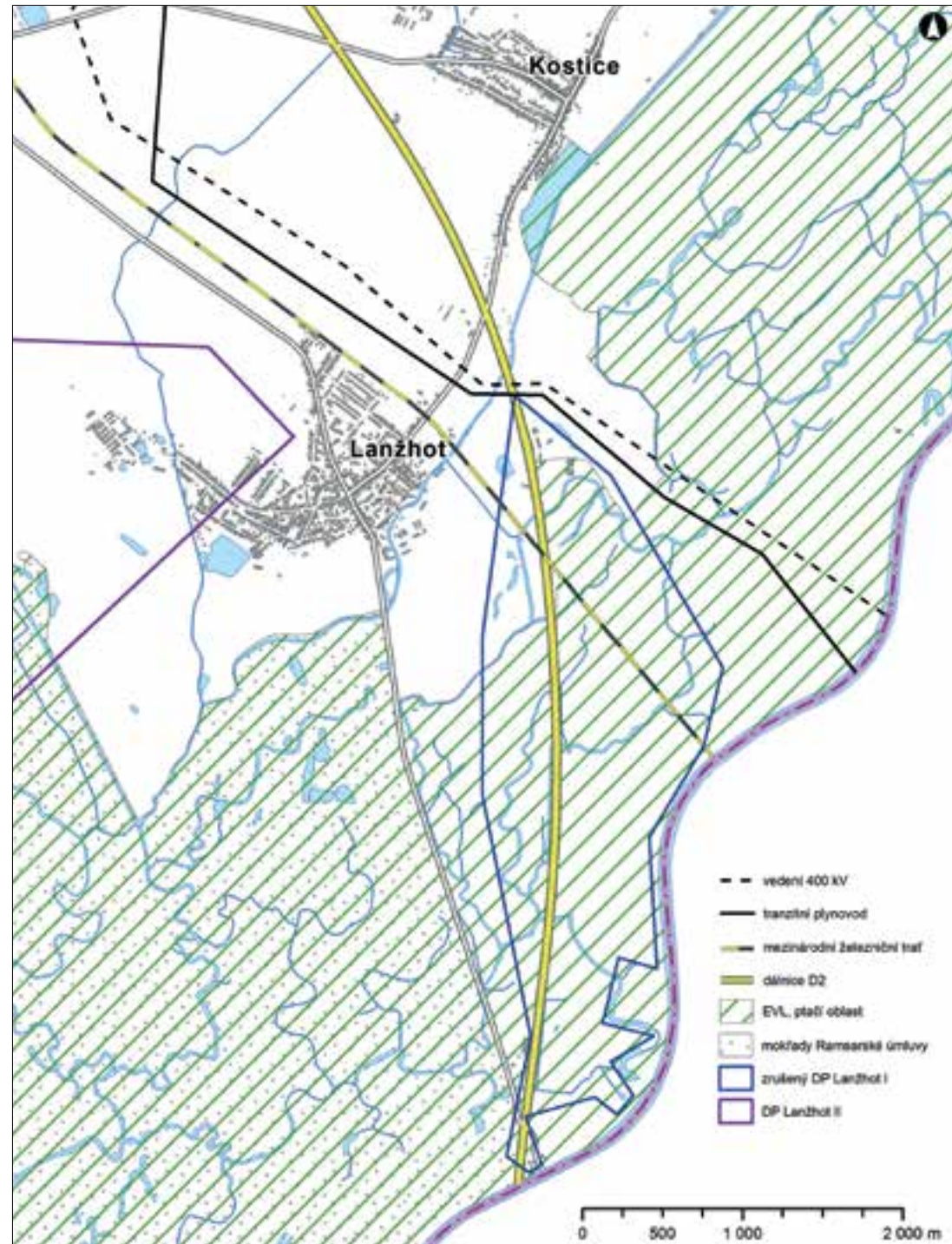
Vlastní lokalita LBr-1 leží na ploše ložiska „Lanzhot-Brodské“ (DP Lanzhot I). Intenzivní těžba ropy a zemního plynu v tomto dobývacím prostoru skončila v šedesátých letech minulého století, v roce 2001 se zde vytěžilo posledních 200 tun ropy. Zásoby uhlovodíků na tomto ložisku byly formálně odepsané v roce 2004 a DP byl zrušen v listopadu 2016. V současné době tedy toto území nepodléhá žádné ochraně tohoto typu.

Pro účely projektu byly kromě ochrany nerostného bohatství posouzeny rovněž potenciální střety zájmů související s potenciálním využitím lokality LBr-1 jako podzemního zásobníku plynu, případně zdroje geotermální energie. V současnosti a ani výhledově se neuvazuje o využití volného objemu ložiska po ukončení těžby uhlovodíků pro účely podzemního zásobníku plynu. Využití lokality LBr-1 jako zdroje geotermální energie není perspektivní vzhledem k relativně nízkému tepelnému gradientu. Lokalita leží mimo oblasti vyčleněné jako vhodné pro využití geotermální energie, proto se využití lokality LBr-1 jako zdroje geotermální energie nepředpokládá a nebylo tudíž ani zařazeno mezi střety zájmů.

Ochrana liniových staveb

Důležité jsou naopak střety zájmů s ochranou liniových staveb. Lokalitou LBr-1 prochází dálnice D2 (Brno–Bratislava, evropská silnice E 65), která protíná celou lokalitou od severu na jih. Severní částí lokality LBr-1 prochází dvoukolejná elektrifikovaná železniční trať Břeclav–Kúty (č. 250). Jak dálnice D2, tak i trať 250 mají mezinárodní charakter a jsou částí transevropské dopravní sítě TEN-T (východní a východo-středomořský koridor, dálnice D2 i baltsko-jadranský koridor) a Panevropského dopravního koridoru IV (E – C 61). Vzhledem k velikosti ochranného pásma dálnice (100 m) a železnice (60 m) představují tyto stavby hlavní střed zájmů na lokalitě.

Obr. 7-1 Mapa vybraných střetů zájmů – liniové stavby (dálnice D2, železnice 250, tranzitní plynovod a elektrické vedení vysokého napětí 400 kV), chráněná území soustavy Natura 2000, chráněné mokřady a dobývací prostory. Obrys dobývacího prostoru Lanžhot II odpovídá hloubce ložiska.



Severní část lokality LBr-1 leží v těsné blízkosti koridoru mezinárodního tranzitního plynovodu a souběžného elektrického nadzemního vedení vysokého napětí 400 kV (viz obr. 71). Ochranné pásmo elektrizační soustavy 400 kV je široké 20m; ochranné pásmo plynovodů je 4m, ale velikost bezpečnostního pásma je 160m.

Žádný z identifikovaných potenciálních střet zájmů a priori nebrání v realizaci geologicko-průzkumných prací na lokalitě LBr-1. Podrobněji jsou střety zájmů popsány v projektovém výstupu V6.1.

7.2 Studie možných zdrojů CO₂ pro pilotní projekt

Cílem tohoto úkolu bylo prověřit možnosti získání dostatečného množství oxidu uhličitého pro injektáž v rámci pilotního projektu. V prvním kroku byly posouzeny alternativy komerčního nákupu CO₂ na trhu (tzv. dodávka CO₂ potravinářské kvality). V dalším kroku byly řešeny jiné potenciální způsoby získání CO₂. Byla provedena analýza existujících zdrojů CO₂ v širším okolí lokality (s využitím údajů z Národního alokačního plánu, popř.

Integrovaného registru znečišťování) a jejich potenciálu z hlediska složení exhalací, procentuálního podílu CO₂ atd. V případech identifikace dobrých předpokladů zdroje emisí pro aplikaci technologie zachytávání CO₂ (např. některé chemické výroby s vysokou koncentrací CO₂ v odpadním plynu) byla se zástupci těchto zařízení vedena osobní jednání za účelem získání podrobnějších informací a prodiskutování možnosti využití produkovaného CO₂ (viz výstup V6.2).

Využití CO₂ potravinářské kvality

Pro posouzení možnosti využití CO₂ potravinářské kvality byl osloven jeden z významných dodavatelů technických plynů v České republice, a to firma Linde Gas. Oxid uhličitý řadí tato firma mezi tzv. technické plyny a získává jej jak z přírodních ložisek, tak i z chemických provozů. Pro předpokládané množství CO₂ ve výši 70 000 t pro základní scénář pilotního ukládání byla analyzována nabídka „komerční“ dodávky CO₂ firmou Linde, jejíž parametry jsou uvedeny v tab. 7-1.

Parametry nabídky odběru CO ₂ potravinářské kvality (ceny bez DPH)	
Čistota, % objemová	99,9%
Orientační cena CO ₂ (včetně dopravy)	6 Kč/kg
Tlak při přepravě	16–18 bar
Místo odběru	Litvínov
Cena jedné cisterny včetně dopravy (24 tun)	144 000 Kč
Cena za 70 000 t CO ₂	420 mil. Kč

Dalším potenciálním komerčním dodavatelem CO₂ je polský provoz firmy Messer u města Kedzierzyn, ve vzdálenosti cca 300 km od lokality LBr-1. Firma prodává kapalný CO₂ potravinářské kvality za cenu 75 € (2100 Kč) za tunu (ceny v roce 2012) v místě výroby (viz tab. 7-2). V ceně není zahrnuta daň a doprava. Odhadem se dá stanovit, že při započtení nákladů na dopravu by cena mohla stoupnout na dvojnásobek. Další údaje nebyly

Cena dodaného CO ₂ (bez DPH)	
cena CO ₂ za 1 tunu bez dopravy	75 € (2 100 Kč)
cena jedné cisterny (24 t) bez dopravy	1 800 € (50 400 Kč)
cena jedné cisterny (24 t) včetně dopravy	3 600 € (100 800 Kč)
Cena za 70 000 t CO ₂	294 mil. Kč

k dispozici, dá se však předpokládat, že z kapacitního hlediska by tento dodavatel neměl problém, protože se jedná o největšího výrobce CO₂ v Polsku. Rovněž čistota plynu (potravinářská kvalita) a další parametry (především tlak – CO₂ je v kapalném stavu) jsou takřka totožné s nabídkou firmy Linde. Problém je však v tom, že firemní politika neumožňuje prodej CO₂ českým subjektům v Polsku a „nutí“ je nakupovat u české pobočky firmy Messer, kde jsou cenové relace srovnatelné s nabídkou firmy Linde.

Potenciální průmyslové zdroje CO₂ v okolí lokality LBr-1

Zdroje CO₂, uváděné v následujícím textu, mohou být potenciálním kandidátem pro aplikaci technologie zachytávání (capture) CO₂ z průmyslových zdrojů. Pro účely pilotního projektu s limitem 100 000 tun uloženého CO₂ však není ekonomické takové technologie aplikovat, pouze v případě využití lokality LBr-1 pro „plné“ ukládání CO₂ ve výši cca 1 Mt by mělo smysl zařízení pro zachytávání CO₂ na některém z těchto zdrojů realizovat. Informace o zdrojích CO₂ v blízké oblasti, které by byly potenciálně použitelné pro pilotní ukládání, byly získány z Integrovaného registru znečišťování životního prostředí (IRZ) a z národního alokačního plánu (NAP). V IRZ byly vyhledány provozovny, které produkují ročně množství CO₂ přesahující 100 000 tun, z NAP pak byl vybrána kompresorová stanice tranzitního plynovodu jako vhodný kandidát pro potenciální pilotní projekt zachytávání CO₂ díky své blízkosti k lokalitě LBr-1 (viz tab. 7-3).

Zajímavým potenciálním zdrojem CO₂ je firma „Duslo“ v Šale na Slovensku, která patří k nejvýznamnějším spo-

Zdroj	typ zdroje	množství CO ₂ [t/rok]	způsob zjištění
CARMEUSE Czech Republic, s. r. o., závod Mokrý	vápenka	115 274	výpočet
Českomoravský cement, a. s., závod Mokrý	cementárna	582 374	výpočet
ČEZ, a. s., Teplárny Hodonín, Poříčí, Tisová a Trmice – lokalita Hodonín	Elektrárna, teplárna	394 121	měření
SAKO Brno, a. s. – divize 3 ZEVO	Spalovna odpadu, teplárna	242 818	měření
Teplárny Brno a. s., Provoz Červený Mlýn	teplárna	97 668	výpočet
Net4Gas, s. r. o.	Kompresorová stanice plynovodu	80 000	výpočet

Tab. 7-2 Orientační cena dodaného CO₂ potravinářské kvality od firmy Messer, Polsko.

< Tab. 7-1 Parametry dodávky CO₂ potravinářské kvality od firmy Linde Gas.

Tab. 7-3 Zdroje CO₂ v blízkosti lokality LBr-1 dle IRZ a NAP.

Tab. 7-4 Parametry CO₂ z firmy „Duslo“.

Hodinová/roční produkce CO ₂	50 tun za hodinu, více než 400 000 tun za rok
Čistota CO ₂	lepší než 95,5 %
Teplota	40 °C
Tlak	atmosférický
Hlavní příměsi	vodní pára

lečnostem chemického průmyslu na Slovensku. Emise, které v současnosti vypouští do atmosféry, se vyznačují vysokou koncentrací CO₂ (viz tab. 7-4).

Z celkového množství produkovaného CO₂ je 40 % vráceno zpět do výroby, kde slouží k výrobě močoviny a 60 % je vypouštěno do atmosféry. Tato část CO₂ by byla využitelná pro potřeby potenciálního pilotního úložiště. Pro účely pilotní injeckáže má produkovaný CO₂ dostatečnou koncentraci; pro potřeby pilotního projektu by bylo nutné provést vysušení CO₂ od zbytků vodní páry, stlačení plynu na požadovaný tlak a vytvořit podmínky (legislativní a licenční) pro odběr plynu pro externí zákazníky – v současné době „Duslo“ CO₂ cizím subjektům neprodává. Odhad nákladů pro odběr CO₂ z „Dusla“ je uveden v tab. 7-5.

7.3 Studie scénářů pro realizaci projektu pilotního úložiště CO₂ v lokalitě LBr-1

Tento úkol byl zaměřen na sestavení možných scénářů zachytávání–doprava–ukládání (capture–transport–storage) a jejich ekonomické vyhodnocení. Z hlediska posouzení možných zdrojů CO₂ vycházela tato práce z výstupu V6.2, od jehož výsledků se rovněž odvíjejí uvažované možnosti dopravy CO₂ na lokalitu úložiště. Pro posouzení vlastního vybudování úložiště (z hlediska injeckážních, monitorovacích, popř. produkčních vrtů a potřebných povrchových zařízení) byly rovněž využity doporučení vyplývající ze scénářů simulace injeckáže

Tab. 7-5 Náklady na separaci a dopravu CO₂ z firmy „Duslo“ cisternami.

Položka	náklady
CAPEX	
Zkpalňovací jednotka	160 mil Kč
Zásobníky v místě zdroje	1,3 mil Kč
Celkem	161,3 mil Kč
OPEX (vztaženo na rok)	
Elektrická energie (zkpalnění + čerpadlo)	14,6 mil Kč + 0,1 mil Kč
Údržba zkpalňovací jednotky (4 %)	4 mil Kč
Údržba čerpadla (4 %)	0,6 mil Kč
Údržba zásobníků (5 %)	0,1 mil Kč
Cena dopravy plynu za rok (400 Kč/1 t/100 km)	5,6 mil Kč
OPEX za rok	25 mil Kč
OPEX za 6 roků	150 mil Kč
Celkem za pilotní projekt (70 000 t CO₂)	346 mil Kč

CO₂ do ložiska v rámci dynamického modelování (Aktivita 3), z rizikové analýzy (Aktivita 4) a z monitorovacího plánu (Aktivita 5). Pro základní scénář pilotního projektu ukládání bylo provedeno orientační ekonomické zhodnocení; pro scénáře dopravy CO₂ bylo zpracováno několik alternativních variant, a to i nad rámec pilotního ukládání.

Zdroje a doprava CO₂ na úložiště

Z pohledu analýzy možných zdrojů oxidu uhličitého je pro základní scénář pilotního projektu neekonomické budovat technologii zachytávání CO₂ z emisí okolních stacionárních zařízení, proto se ve scénářích předpokládá získání CO₂ nákupem z komerčních zdrojů (Linde, Messer), případně z chemických provozů firmy „Duslo“ (Šafa, Slovensko).

Orientační porovnání nákladů na získání CO₂ nákupem včetně dopravy automobilovými cisternami uvádí tab. 7-1 a tab. 7-2. Pro získání CO₂ z chemických provozů, konkrétně z firmy „Duslo“, je nutné vysušit emise s obsahem 95 % CO₂ a následně poměrně čistý CO₂ stlačit na tlak 16 barů a současně zkapalnit, aby byl vhodný pro přepravu cisternami. Investiční náklady (CAPEX) na zařízení takových zařízení jsou odhadovány podle obdobných instalací v zahraničí (Mohitpour et al. 2003, Yanget et al. 2012), za předpokladu ročního odběru ve výši 11 700 t CO₂. Provozní náklady (OPEX) vycházejí především z příkonu zkpalňovacího zařízení. Základní scénář pilotního projektu ukládání předpokládá 6letou dobu realizace, vzdálenost Šafa – lokalita LBr-1 je 120 km. Odhad nákladů ukazuje tab. 7-5.

V nákladech není započítán náklad na výstavbu „předávacího zařízení“ a především obtížně odhadnutelné náklady na získání oprávnění (licence) k prodeji CO₂ jako technického plynu pro firmu „Duslo“.

Doprava potrubím je efektivní při výrazně větších odběrech, než jaký představuje množství 11 700 tun ročně pro základní scénář pilotního projektu. V rámci projektu byly řešeny scénáře potenciální přepravy CO₂ ve výši 1 Mt za rok potrubím o průměru 8" (203 mm) a pro srovnání i přepravu ve výši 2 Mt za rok potrubím o průměru 10" (254 mm). Oba tyto scénáře jdou nad rámec pilotního projektu a překračují i úložný potenciál úložiště na lokalitě LBr-1, ale ukazují, že přeprava potrubím je efektivní právě při takovýchto přepravních kapacitách. Výpočet parametrů potrubí pro přepravu CO₂ se v Česku ještě neprováděl a proto byly opět použity výsledky zahraničních studií (McCoy 2009, McCoy – Rubín 2005, 2008) Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 7-6.

Náklady CAPEX jsou vztaženy na předpokládanou délku potrubí 100 km; náklady OPEX na jeden rok provozu a na dopravené množství 1 Mt resp. 2 Mt CO₂ za rok. Náklady na tunu přepraveného CO₂ při životnosti produktovodu 30 let pak představují (varianta 1 Mt ročně) 400 Kč, což je stejná hodnota, jako náklad na přepravu 1 t CO₂ na vzdálenost 100 km autocisternou. Toto

Tab. 7-6 Náklady na dopravu CO₂ z chemické továrny „Duslo“ potrubím.

položka	Varianta	
	1 Mt/rok	2 Mt/rok
Průměr potrubí	8"	10"
CAPEX		
Kompresní stanice	1620 mil Kč	2135 mil Kč
Rekompresní stanice na zvýšení tlaku	Do 110 km délky potrubí není při 1 Mt CO ₂ /rok nutná	218 mil Kč
Potrubí	1092 mil Kč	1388 mil Kč
Celkem CAPEX	2712 mil Kč	3741 mil Kč
OPEX (vztaženo na rok)		
Elektrická energie (kompresor + rekompresní stanice)	236 mil Kč + 0 Kč	475 mil Kč + 19,8 mil Kč = 494,8 mil. Kč
Údržba kompresorové stanice (4%)	64,8 mil Kč	85,4 mil Kč
Údržba rekompresní stanice (4%)	–	8,74 mil Kč
Údržba potrubí (3100 USD/1km/rok)	7,75 mil Kč	7,75 mil Kč
Celkem OPEX	308,5 mil Kč	596,7 mil Kč
Celkem CAPEX + OPEX	3020 mil Kč	4334 mil Kč

porovnání potvrzuje vhodnost scénáře dopravy cisternami pro základní pilotní projekt ukládání CO₂.

Pro úplnost uvádíme, kolik CO₂ se vyprodukuje při přepravě CO₂ cisternami v rámci základního scénáře pilotního projektu. Při výpočtu jsme vycházeli z metody EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Jestliže předpokládáme průměrnou spotřebu nákladního automobilu s nákladem 24 tun CO₂ na úrovni přibližně 35 l nafty na 100 km, pak tomu odpovídají průměrné emise CO₂ 940 g/km. Plánované množství 70 000 t CO₂ by bylo dopraveno během 2 920 cest z Litvínova do lokality LBr-1. Tomu odpovídá celková ujetá vzdálenost 2 158 333 km a zhruba 1090 tun emisí CO₂, které tvoří zhruba 1,5 % objemu CO₂, které bude injektováno v rámci pilotního projektu ukládání.

Doplňkový průzkum úložiště

Základní scénář pilotního projektu ukládání CO₂ předpokládá doplňkový průzkum úložiště před zahájením vlastní injeckáže CO₂. Potřeba tohoto dodatečného průzkumu vyplývá z výsledků Aktivit 1, 2, 3 i 4. Především studium geomechaniky hornin a geochemie hornin i horninových fluid ukázaly, že vzorky hornin a fluid, které byly pro projekt REPP-CO₂ k dispozici, nebyly úplně postačující pro komplexní vyhodnocení parametřů lokality LBr-1 jako pilotního úložiště CO₂. K dispozici totiž byly pouze archivní vzorky staré více než 50 let, a především množství materiálu z vlastní úložné struktury bylo velmi omezené. Doplňkový průzkum by měl zodpovědět otázky uvedené v tab. 7-7.

Tab. 7-7 Přehled parametrů, které je potřebné upřesnit.

Potřebné informace	Metody měření
Jaké je napětí horninového masivu a jaké jsou jeho směry? Jaký je tlak v pórech v zájmové oblasti?	Některé z těchto informací lze získat v průběhu testů ve vrtu.
Jaké jsou elastické parametry rezervoárových hornin a jaká je stlačitelnost pórů?	Elastické parametry lze získat buď měřením in-situ na základě akustických principů (poměr napětí a tlaku při dané akustické/vibrační frekvenci – <i>dynamické moduly</i>) nebo experimenty na vzorcích z vrtných jader (<i>statické moduly</i>). Stlačitelnost pórů se stanoví pomocí zkoušek na vrtných jádrech.
Jaké jsou parametry pevnosti rezervoárových hornin?	Pevnost stanovíme měřením na vzorcích z vrtných jader pomocí jednoosých a triaxiálních testů, "brazílského" testu (pevnost v tahu) a měřením tlaku při tzv. kolapsu pórů. Pro zhodnocení pevnosti hornin může být také použito měření akustické karotáže ve vrtu, pokud je známa závislost mezi pevností a pružností dané horniny.
Jaká je horizontální permeabilita v různých hloubkách vrtu?	Údaje lze získat krátkodobými tlakovými testy ve vrtu. Během těchto testů lze získat i vzorky formačních fluid, na nichž čímž lze provést detailní chemické analýzy i ložiskových fluid.
Do jaké míry mohou časově a teplotně závislé chemické proměny změnit mechanické vlastnosti hornin?	Údaje lze získat speciálními laboratorními experimenty na relevantních horninových jádrech. Slabý roztok kyseliny, vznikající mísením CO ₂ s formačními fluidy, může způsobovat chemické změny, které dále mění mechanické vlastnosti hornin, a to zvláště v případě, kdy je pevnost horniny podpořena přítomností vápenného tmelu.

Scénáře ukládání

Realizace vlastního pilotního projektu je zásadním krokem pro posun úrovně technologické připravenosti (TRL) metody geologického ukládání CO₂ v českém prostředí z úrovně TRL 4 (technologie ověřená v laboratoři) na úroveň TRL 5 (technologie ověřená v relevantním prostředí). Pro geologické ukládání CO₂ znamená TRL 5 jeho ověření formou pilotního projektu na konkrétní geologické struktuře obdobného typu jako případná budoucí úložiště průmyslového měřítka. Současně má pilotní projekt ověřit proveditelnost ukládání CO₂ ve velkém měřítku a možnost komerčního využití CO₂ (CCUS) na lokalitě LBr-1, ale i u dalších ložisek uhlovodíků ve Vídeňské pánvi, v podobě dotěžení zbytkové ropy pomocí injektáže CO₂.

Základní scénář pilotního projektu ukládání oxidu uhličitého na LBr-1 vychází především z dynamických simulací, provedených v rámci Aktivita 3. Zahájení vlastního pilotního projektu se předpokládá v roce 2020, což je realistický scénář, který zohledňuje současný stav připravenosti i nutnost vyřešení dalších dodatečných dílčích problémů, které vyplynuly při řešení projektu REPP-CO₂. Scénář má tyto základní parametry:

- Doba trvání pilotní injektáže je navržena na 6 let, což umožní realizovat dostatek testů injektivit (veličina charakterizující jak snadno může být tekutina, jako např. CO₂, injektována do geologické formace, definovaná jako rychlost injektáže dělená rozdílem tlaků uvnitř vrtu a v rezervoáru v bodě injektáže) a postupného testování tlakových změn, stejně jako instalaci a prověření vhodných monitorovacích technologií a postupů.
- Celkový plánovaný objem uloženého CO₂ je 70 000 tun, což splňuje ustanovení zákona o ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur (85/2012 Sb.), § 1, odst. 2: „Tento zákon se nevztahuje na ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur s celkovou zamýšlenou úložnou kapacitou nižší než 100 kilotun prováděné za účelem výzkumu, vývoje nebo zkoušení nových výrobků a postupů“. Zatlačení v průběhu 6 let představuje injektáž 11 666 tun za rok, což je přibližně 18 000 standardních m³ (objem při teplotě 15 °C a tlaku 101,325 kPa) za den.

Základní scénář pilotního projektu předpokládá použití jednoho injektážního vrtu, umístěného v blízkosti lokality již zlikvidovaného vrtu Br-89.

Pro základní scénář pilotního projektu (ukládání 70 000 tun CO₂ po dobu 6 let) bylo provedeno orientační ekonomické zhodnocení. Byly odhadnuty investiční (pořizovací) náklady, tedy náklady na vyhloubení a vystrojení injektážního a monitorovacích vrtů i náklady provozní pro dobu 6 let pilotního ukládání. Byl

uvažován nákup CO₂ od firmy Linde (především z logistických důvodů) a doprava cisternami.

Nejdůležitější investiční položkou jsou náklady na vyvrtání 3 vrtů do hloubky 1200 m (jednoho injektážního a dvou monitorovacích – viz monitorovací plán, výstup V5.8) ve výši celkem 90 mil. Kč. Náklady na vystrojení injektážního vrtu byly odhadnuty na 9 mil. Kč, částka 10 mil. Kč je odhad na vystrojení 2 monitorovacích vrtů. Další nezbytnou investiční položkou jsou náklady na komplex injektážního zařízení (skladování, stlačení a ohřev CO₂) ve výši 15 mil. Kč. Z provozních nákladů je nejvyšší položkou povrchový monitoring včetně měření opakované 3D seismiky pro sledování oblaku CO₂ v rezervoáru. Samostatnou položkou jsou náklady na nákup a dopravu 70 000 tun CO₂. Přehled nákladů ukazuje tab. 7-8 (ceny bez DPH).

investiční náklady (CAPEX)	mil. Kč
vyvrtání 3 vrtů (1 injektážní, 2 monitorovací)	90
zařízení pro injektáž CO ₂ (kompresor, ohřev)	14
vystrojení 2 monitorovacích vrtů	10
vystrojení injektážního vrtu	9
příprava lokality-pracoviště	9
tlakové nádoby na skladování CO ₂	3
řízení provozu (velín) a laboratoř	4
celkem pořizovací	139
provozní náklady za dobu 6 let (OPEX 6 let)	
monitoring vč. 3D seismiky	40
energie	4
osobní náklady vč. ostrahy (6 let)	25
celkem provozní	69
pořizovací a provozní náklady celkem	208
nákup CO₂ (70 000 t)¹	420
náklady základního scénáře celkem	628

Jak je patrné z tab. 7-8, bude nákup CO₂ na trhu největší nákladovou položkou při vlastní realizaci základního scénáře projektu pilotního úložiště CO₂. O něco levnější by byl oxid uhličitý získaný z vhodného průmyslového zdroje emisí, např. chemičky „Duslo“ (viz tab. 75), ale stále bude představovat nejvyšší nákladovou položku (346 mil. Kč). Případný „úsporný“ scénář, při kterém by se uložilo menší množství CO₂ (minimální smysluplný objem pro pilotní projekt se pohybuje v rozmezí 10 000–15 000 tun CO₂ injektovaných v průběhu 2 let) představuje úsporu především v položce „nákup CO₂“ a v provozních nákladech, zatímco pořizovací náklady zůstávají nezměněné.

¹ Uvedená částka vychází z informací poskytnutých firmou Linde (cena za dodávku 222 EUR/t CO₂). Z ústních informací poskytnutých partnery z asociace CO2GeoNet vyplývá, že za příznivých okolností lze dosáhnout nižší ceny dodávky CO₂, optimálně v rozmezí 100–120 EUR/t. To by znamenalo výrazné snížení celkových nákladů na realizaci pilotního projektu.

Je třeba zdůraznit, že výše uvedené náklady představují pouze kvalifikovaný odhad. Jsou založeny zejména na znalosti trhu geologických a vrtných prací, zkušenostech autorů zprávy, rámcovém průzkumu trhu s CO₂ a informacích od partnerů z evropské asociace CO₂-GeoNet, kteří již mají zkušenosti s realizací obdobných projektů (projekty Ketzin, Hontomín a Heletz). Odhad nezahrnuje náklady na uzavření úložiště a jeho monitoring po uzavření.

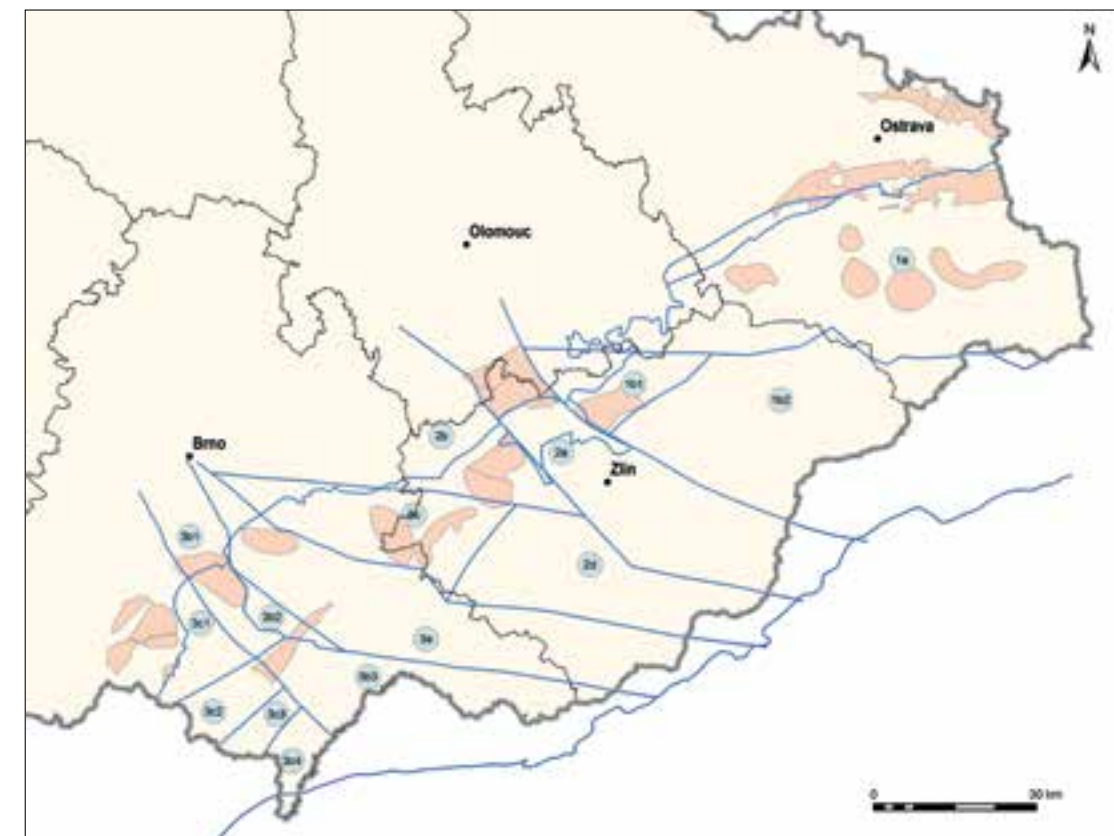
V rámci Aktivita 3 byly modelovány a vyhodnoceny i tři další alternativní scénáře injektáže CO₂ – „ukládání“, „intenzifikace těžby“ a „kombinovaný scénář“ (viz kap. 4.8). Všechny tyto scénáře přesahují rámec základního pilotního projektu a pracují s maximálním rozsahem kapacity úložiště. Jejich realizace připadá v úvahu pouze za předpokladu, že ukládání CO₂ „průmyslového“ rozsahu (nad 100 000 t) bude na území ČR po roce 2020 povoleno.

7.4 Rebilance úložné kapacity pro CO₂ v geologických strukturách karpatské soustavy na území ČR

V rámci této části projektu bylo provedeno komplexní přehodnocení možností ukládání a úložné kapacity pro

CO₂ ve strukturách vyskytujících se na území karpatské soustavy v ČR, tedy na střední a východní Moravě. Přednostně byly posuzovány akviferové struktury, splňující rámcově podmínky hydrogeologické uzavřenosti a vyhovující termodynamickým a hloubkovým limitům pro úložiště, a rovněž ekonomickým podmínkám (dostatečný objem kolektorů v příznivých p-T poměrech – hloubky pod povrchem minimálně 800 m). Jako základ pro toto přehodnocení sloužila informační báze získaná v průběhu desítek let v rámci výzkumných prací na ropu a plyn organizovaných v ČGS (dříve ÚÚG a ČGÚ) a dalších rezortních, dříve státních organizacích, která zahrnuje původní i interpretovaná data ze seizmických liniových měření, vrtnou prozkoumanost v oblasti, karotážní měření, hydrogeologickou i hydrogeochemickou databázi a také výsledky petrofyzikálních měření vrtných jader i povrchových vzorků. Významným podkladem byly kolekce schémat a strukturních map sestavené v rámci tzv. „sovětské expertizy“ (Chnykin et al. 1986) a také v rámci několika dlouhodobých tzv. „naftových“ úkolů, řešených v gesci bývalého ÚÚG.

Na základě výše popsaných kritérií bylo pracovníky ČGS a VŠB vytipováno 23 geologických struktur potenciálně vhodných pro vybudování úložiště CO₂. Každá



Legenda: severomoravský blok (1) – malenicko-hornoslezská kra (1a), rusavsko-turzovská kra (1b), dílčí kra rusavská (1b1), dílčí kra jablůnecko-turzovská (1b2); středomoravský blok (2) – kra homomoravského úvalu (2a), kra drahanská (2b), kra šlapanická (2c), kra uherskobrodská (2d); jihomoravský blok (3) – nesvačilská kra (3a), měninská kra (3b), dílčí nikolčická kra (3b1), dílčí němečická kra (3b2), dílčí bílovecká kra (3b3), pavlovská kra (3c), dílčí kra mikulovská (3c1), dílčí kra rakvičská (3c2), dílčí kra mistelbašská (3c3), dílčí kra ústřední moravské prohlubně (3c4).

Obr. 7-2 Rozmístění vytipovaných struktur v karpatské soustavě.

Tab. 7-9 Souhrnné údaje o parametrech vytipovaných struktur pro ukládání CO₂.

blok	objekt	název	kolektor	plocha (km ₂)	mocnost (km)	porozita (%)	porézní prostor (km ₃)	celkový porézní prostor objektů (km ₃)	průměrná hloubka (m)	krycí horizonty
sever	A	Dětmarovický výmol-východ	bazální klastika badenu (detrit)	42,00	0,092	19	0,735	0,735	1000	pelity spodního badenu
	B	Dětmarovický výmol-střed	bazální klastika badenu (detrit)	11,00	0,023	19	0,049	0,049	1000	pelity spodního badenu
	C	Dětmarovický výmol-západ	bazální klastika badenu (detrit)	25,00	0,022	19	0,106	0,106	900	pelity spodního badenu
	D	Bludovický výmol-východ	bazální klastika badenu (detrit)	93,00	0,093	16	1,387	1,387	1150	pelity spodního badenu
	E	Bludovický výmol-západ	bazální klastika badenu (detrit)	107,00	0,092	16	1,576	1,576	950	pelity spodního badenu
	I	Starý a Nový Jičín	klastika karpátu	34,12	0,050	15	0,256	0,298	850	karpatský flyš
			navětralý povrch paleozoika	34,12	0,025	5	0,043		850	karpatský flyš
	II	Fryčovice	klastika karpátu	15,37	0,035	15	0,081	0,119	800	karpatský flyš
			navětralý povrch paleozoika	15,37	0,050	5	0,038		800	karpatský flyš
	III	Kozlovice-Lhotka	klastika karpátu	35,32	0,030	15	0,159	0,194	800	karpatský flyš
			navětralý povrch paleozoika	35,32	0,020	5	0,035		800	karpatský flyš
	IV	Frýdlant-Malenovice	klastika karpátu	55,33	0,025	15	0,208	0,249	1250	karpatský flyš
			navětralý povrch paleozoika	55,33	0,015	5	0,042		1250	karpatský flyš
	V	Vyšší Lhoty-Morávka-Oldřichovice	klastika karpátu	55,78	0,015	10	0,084	0,139	1450	karpatský flyš
			navětralý povrch paleozoika	55,78	0,020	5	0,056		1450	karpatský flyš
střed	I	Koryčany	klastika karpátu	28,00	0,010	15	0,042	0,042	1400	karpatský flyš
	II	Osvětimany-Stupava	klastika karpátu	18,00	0,050	15	0,135	0,135	2100	karpatský flyš
	III/1	Zdounky-Bařice	klastika karpátu	45,45	0,010	15	0,068	0,292	1800	karpatský flyš
			klastika karpátu	42,64	0,035	15	0,224		1800	karpatský flyš
	IV	Vlkoš-Lobodice	klastika badenu	60,00	0,060	15	0,540	0,540	1000	pelity badenu
V	Rusava	klastika karpátu	58,21	0,030	15	0,262	0,262	1400	karpatský flyš	
jih	I	Mikulov	klastika eggenburgu	5,55	0,060	14	0,047	0,105	1450	šliry ottnangu
			klastika karpátu	5,55	0,070	15	0,058		1450	šliry svrch. karpátu
	II	Mušov	klastika eggenburgu	11,84	0,050	14	0,083	0,179	1050	šliry svrch. karpátu
			klastika karpátu	8,00	0,080	15	0,096		1050	šliry svrch. karpátu
	III/1	Drnholec	klastika eggenburgu a sp. karpátu	15,27	0,070	15	0,160	0,160	850	šliry karpátu, baden. tégly
	IV	Iváň	klastika eggenburgu a sp. karpátu	37,27	0,100	20	0,745	0,745	950	šliry karpátu, baden. tégly
	V	Vlasatice	klastika eggenburgu	9,00	0,050	20	0,090	0,090	800	šliry karpátu, baden. tégly
	VI	Nosislav-Nikolčice	klastika eggenburgu a sp. karpátu	35,00	0,070	15	0,368	0,368	1150	karpatský flyš, pelity karpátu
VII	Kobeřice	klastika eggenburgu	18,00	0,030	15	0,081	0,113	1300	karpatský flyš, aut. paleogén	
		autochtonní paleogén	6,00	0,028	19	0,032		1750	karpatský flyš, aut. paleogén	
VIII	Kobylí	pískovce ždánicko-hustopečského s.	43,49	0,400	16	2,783	2,783	2800	karpatský flyš	

z těchto struktur byla podrobně popsána v unifikovaném formátu v podobě „Evidenční karty perspektivních objektů na ukládání CO₂“. Charakteristika každého objektu je autonomní a nepotřebuje přímé odkazy na další zdroje dat. Rozmístění objektů je ukázáno na obr. 7-2 (barevné plochy) spolu s vrtnou prozkoumaností (červené body), seizmickou prozkoumaností (modré tenké linie) a tektonickým členěním území (modré silné linie a označení bloků čísly a písmeny v kruzích na modrém pozadí). Názvy tektonických bloků jsou uvedeny v legendě k obrázkům.

Širší geologická a hydrogeologická informace o dílčích územních a geologických celcích lze zjistit v popisích jednotlivých objektů v evidenčních kartách (výstup V6.4). To platí o kolektorských souvrstvích i o krycích horninách a dalších parametrech. Integrita kolektorů a vytipovaných objektů byla obecně posuzována zejména na základě indikací hydrogeologické uzavřenosti z výsledků analýz vod z čerpacích zkoušek. Až na druhém místě byla uzavřenost pouze předpokládána, a to na základě existence vhodných krycích horninových vrstev nebo komplexů. Významné parametry pro posouzení perspektivnosti litostratigrafických jednotek a kapacit kolektorů byly přebírány zejména z karotážních měření ve vrtech, laboratorních petrofyzikálních měření a také z průběhu čerpacích zkoušek. V některých případech jsme se opírali i o srovnávací hodnoty porozit ve vztahu k hloubce pro hlavní litostratigrafické komplexy svahů Českého masivu, které představují součást zprávy Chnykina et al. (1986). Pozice perspektivních objektů je v evidenčních kartách vyjádřena souřadnicemi „extrémních“ bodů vzhledem ke světovým stranám a zprůměrně uvedením katastrů dotčených obcí. V kartách jsou uvedeny rovněž podklady pro případné řešení střetů zájmů.

Rozhodující údaje o pórovém objemu kolektorských hornin vytipovaných objektů, hloubkách a krycích horizontech jsou uvedeny v tab. 7-9. Úložná efektivní kapacita jednotlivých objektů vychází z pórového objemu kolektorů, hustoty CO₂ v superkritickém stavu a hodnoty koeficientu efektivnosti 10%. Údaje o kapacitě jednotlivých objektů jsou uvedeny v tab. 7-10. Celková efektivní úložná kapacita zpracovaných objektů představuje 669,6 Mt CO₂.

Oblast Vídeňské pánve (dílní kry rakvícká (3c2), mistelbašská (3c3) a dílní kry ústřední moravské prohlubně (3c4) – viz obr. 7-3 – byly z hlediska úložné kapacity oceňeny v regionálním měřítku. Jako potenciální kolektor úložiště byly vybrány horniny středního badenu (svrchní langh-spodní serravall). S využitím mapových podkladů

Název objektu (struktury)	Efektivní úložná kapacita pro koeficient efektivnosti 10% [Mt CO ₂]
Dětmarovický výmol – východ	46,3
Dětmarovický výmol – střed	3,1
Dětmarovický výmol – západ	6,7
Bludovický výmol – východ	87,4
Bludovický výmol – západ	99,3
Starý a Nový Jičín	17,9
Fryčovice	6,0
Kozlovice-Lhotka	12,2
Frýdlant-Malenovice	15,7
Vyšší Lhoty-Morávka-Oldřichovice	8,8
Koryčany	2,6
Osvětimany-Stupava	8,5
Zdounky-Bařice	18,4
Vlkoš-Lobodice	34,0
Rusava	16,5
Mikulov	6,6
Mušov	11,3
Drnholec	10,1
Iváň	46,9
Vlasatice	5,7
Nosislav-Nikolčice	23,2
Kobeřice	7,1
Kobylí	175,3
Celkem	669,6

Kocáka et al. (1985) a Chnykina et al. (1986) byla stanovena průměrná mocnost kolektoru 30,45 m a prognózní plocha 150 km². Volumetrickou metodou a s obdobnými parametry jako v případě výše uvedených vytipovaných objektů byla odhadnuta regionální efektivní úložná kapacita hornin středního badenu ve Vídeňské pánvi na 452 Mt CO₂.

Celkem přináší rebilance úložné kapacity vhodných struktur v karpatské soustavě na území ČR potenciál pro uložení více než 1000 Mt (1 Gt) CO₂ v kategorii efektivní kapacity. Je potřeba uvést, že tato hodnota je pouze základem pro další upřesnění reálné (matched) úložné kapacity, která může být řádově nižší, než je námi vypočtená kapacita efektivní. Podrobnosti jsou uvedeny ve výstupu V6.3.

Tab. 7-10 Efektivní úložná kapacita vytipovaných struktur (objektů).

LITERATURA

- Chnykin, V. I. et al. (1986): Zpráva o vědecko-výzkumných pracích provedených v rámci kontraktu č. 55 – 183/27800 „Racionální a vědecky zdůvodněné zaměření geologicko-průzkumných prací na ropu a zemní plyn na území ČSR na období 1987–1990 a následující léta“. – MS Geofond Praha.
- Kocák, A. – Mayer, S. – Čajka, R. – Buchta, Š (1985): Strukturální mapy Vídeňské pánve na svrchní hranici lábského obzoru. – MS Geofyzika.
- McCoy, S. T. (2009): The Economics of CO₂ Transport by Pipeline and Storage in Saline Aquifers and Oil Reservoirs. – Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, April, 2009.
- McCoy, S. T. – Rubin, E. S. (2005): Model of CO₂ Transport and Storage Costs and Their Importance in CCS Cost Estimates. – Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, April, 2005.
- McCoy, S. T. – Rubin, E. S. (2008): An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to CCS. – International Journal of Greenhouse Gas Control (2008), pp 219–229.
- Mohitpour, M. – Colshan, H. – Murray, A. (2003): Pipeline Design and Construction. A Practical Approach. – ASME International, 656 pp.
- Yang, S. – Lee, U. – Jeong, Y.S. – Kim, J. – Lee, C. – Han, C. (2012): Process design and cost estimation of carbon dioxide compression and liquefaction for transportation. – Korean Chem. Eng. Res. 2012, 50, 988–993.

SEZNAM VÝSTUPŮ AKTIVITY 6

- V6.1 Zpráva o posouzení střetů zájmů při využití geologické struktury LBr-1 pro geologické ukládání CO₂
- V6.2 Studie možných zdrojů CO₂ pro projekt pilotního úložiště v lokalitě LBr-1
- V6.3 Studie scénářů pro realizaci projektu pilotního úložiště CO₂ v lokalitě LBr-1 včetně ekonomického vyhodnocení
- V6.4 Zpráva o reibilanci úložné kapacity pro CO₂ v geologických strukturách karpatské soustavy na území ČR

8. Výzkumné aktivity

Hlavním cílem výzkumných aktivit, které byly soustředěny do projektové Aktivity 7, bylo rozvinout a zdokonalit metodiku vybraných laboratorních, modelovacích, simulačních a monitorovacích postupů a technik, které mají význam pro posuzování úložišť CO₂ a s ním spojené aktivity. Výzkum vycházel z reality modelového ložiska LBr-1, z analýz a dat získaných v průběhu řešení projektu v rámci ostatních aktivit, ale zahrnoval i vlastní dodatečná terénní a laboratorní měření, analýzy a modelování. V některých případech byly využity také poznatky a data z jiných lokalit v oblasti Vídeňské pánve i mimo tento region. Řada použitých postupů a metodik je již známa z jiných oblastí (např. ropný průmysl, skladování zemního plynu, zřizování podzemních úložišť jaderného odpadu apod.), bylo je však nutno přizpůsobit potřebám geologického ukládání CO₂. Některé metodiky však byly zpracovány a testovány zcela nově. Většina nově navržených postupů byla v rámci projektu ověřena terénním měřením nebo laboratorně.

Aktivita 7 byla rozdělena do 5 dílčích úkolů, jejichž výsledky jsou popsány v dalším textu. Hlavním řešitelem aktivity byl partner VŠB, spoluřešiteli byly ČGS, ÚFZ a ÚJV.

8.1 Metodický výzkum v oblasti laboratorního testování rezervoárových a těsnících hornin a jejich interakce se superkritickým CO₂ a rezervoárovými fluidy v podmínkách úložiště

V laboratořích VŠB byly provedeny experimentální práce, které měly za úkol kvantifikovat dynamické procesy probíhající v důsledku proudění spCO₂ v horninovém prostředí obsahujícím ložiskovou vodu a ropnou fázi. Tyto relativně krátkodobé experimenty nedokážou postihnout plný rozsah změn, které probíhají na kontaktu horninavodaspCO₂ a mají tak za úkol postihnout především relativní mobilitu jednotlivých fází, zdánlivé konečné saturace jednotlivými fázemi a případné poškození horninové formace v důsledku působení jednotlivých tekutin.

Experimenty byly realizovány na horninových vzorcích, reprezentující porézní médium. Tyto vzorky tvořil hlavně hořický pískovec. Dále byl vybrán reprezentativní vzorek ropy z ložiska Hrušky, alternativní vzorek ropy z ložiska Ždánice a syntetická ložisková voda, připravená v laboratořích VŠB dle analýz solanky z ložiska LBr-1.

Výzkum byl zaměřen na popsání proudění jednotlivých fází v horninovém prostředí a relativní srovnání vlastností systémů vodaropa a vodaropaspCO₂. Optimalizace ukládání oxidu uhličitého má za úkol maximalizovat množství CO₂ uloženého v horninové formaci. Jeli úložištěm částečně vytěžené ložisko ropy, nabízí se

zároveň možnost dodatečné produkce ropy z úložné. Provedený výzkum reflektuje oba tyto aspekty.

Jádrém výzkumu byly dynamické experimenty prováděné na fázovém permeamtru BRP 350 (Vinci Technology). Experimenty byly prováděny za ložiskových teplotnětlakových podmínek ložiska LBr-1. Díky nedostupnosti jader z rezervoárové struktury ložiska byl jako reprezentativní model porézního prostředí zvolen dostupný hořický pískovec. Vzorek byl saturován syntetickou ložiskovou vodou. Poté byl vzorek umístěn do měřicí cely permeamtru, kde byl ponechán po dobu dvou dnů za simulovaných ložiskových podmínek, a to teploty 43 °C, simulovaného tlaku nadloží 13,79 MPa a pórového tlaku 8,27 MPa. Poté byla stanovena jeho absolutní propustnost.

Následně bylo přistoupeno k saturaci jádra ropou, která vytěšňovala vodu z pórových prostor, a to do doby, než voda přestala z jádra vytékat. Objem vytěšněné vody byl odečten od objemu pórů vzorku. Tím byl zjištěn objem ropy, která se nyní nachází ve vzorku, a také zbytková saturace vodou S_{wi} . Zároveň byl stanoven efektivní koeficient propustnosti vzorku pro ropu při úrovni saturace vodou – $k_o(S_{wi})$. V této fázi byl vzorek ponechán za ložiskových podmínek po dobu cca 2–4 týdnů, aby došlo k dosažení rovnováhy mezi tekutinami a minerální fází. V průběhu tohoto období byl vzorek periodicky proplachován ropou, přičemž byl zaznamenáván další případný úbytek vody ze vzorku a opravena hodnota S_{wi} .

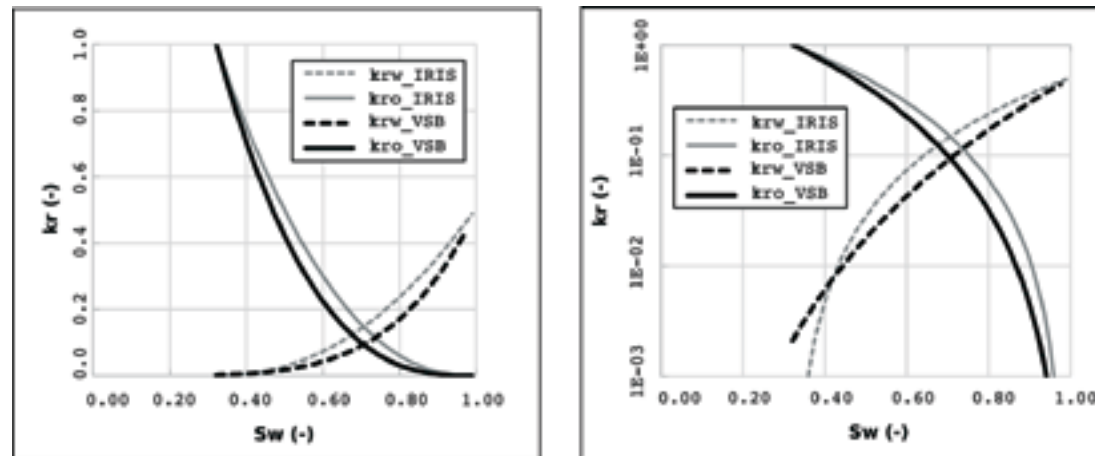
Poté následovala fáze vytěšňování ropy druhou tekutinou, v tomto případě vodou a CO₂. V průběhu této fáze byl zaznamenáván objem vtláčené tekutiny, objem vytěšněné ropy a tlakový spád podél vzorku. Po vytěšnění veškeré mobilizovatelné ropy ze vzorku byla stanovena reziduální saturace ropnou fází S_{or} a efektivní koeficient propustnosti pro vodu $k_w(S_{or})$, respektive pro CO₂ $k_g(S_{or})$ za dané saturace ropnou fází.

Hodnoty efektivních propustností pak byly normalizovány bázovou propustností – zpravidla $k_o(S_{wi})$ pro výsledné relativní koeficienty propustnosti $k_{ro}(S_{wi})$ a $k_{rw}(S_{or})$. Saturace se pak normalizuje objemem pórů.

Výše popsaný postup byl rovněž aplikován na data z dynamického experimentu ropavoda, která byla poskytnuta partnerem IRIS (experiment byl proveden v rámci Aktivity 3). Srovnání interpretací vykazuje velmi dobrou shodu (obr. 8-1) – odmocniny sumy kvadrátů odchylek dosahují hodnot $RMSE(K_{rw}) = 0,04$ a $RMSE(K_{ro}) = 0,05$.

Uvedený experimentální postup a jeho interpretace se jeví vhodným k posouzení dynamického proudění dvou fází horninovým prostředím. Experiment proběhl standartní procedurou neustáleného vytěšňování jedné fáze druhou na modelu porézního prostředí. Výsledky

Obr. 8-1 Srovnání interpretací křivek relativní propustnosti různými korelacemi.



rovněž potvrzují, že spCO₂ je velmi vhodným agentem pro vytěšňování ropy z horniny, protože vykazuje mnohem lepší vlastnosti než voda.

Metodický postup použitý pro hodnocení poškození horninové formace precipitací ropných složek v důsledku její interakce se spCO₂ se zakládá na běžných postupech hodnocení redukce propustnosti v ropném průmyslu. Výsledky provedených experimentů nevykázaly významný vliv spCO₂ na ropu z ložiska Hrušky (analog ropy z ložiska LBr-1). Použitý srovnávací vzorek těžší ropy z ložiska Ždánice vykázal po expozici spCO₂ vliv na propustnost vzorku, která byla interpretována jako blokáce pórů o poloměru menším než 0,32 μm.

Testovaná metodika je snadno použitelná a nevyžaduje žádné speciální technologické nároky. Jako doplněk experimentální procedury je možno doporučit užití rtuťové porozimetrie k odhadu distribuce velikosti pórů v prostor ve zkoumaném vzorku.

Další experimentální práce provedené partnerem ÚJV cílily na testování vzorků nasycených různými typy ropných látek v dynamické aparatuře pro průchod spCO₂. Tato aparatura umožňuje stanovení propustnosti horniny pro vodu a spCO₂; kromě toho jsou sledovány minerální změny, kterým horniny při těchto procesech procházejí. Experimenty byly připraveny na horninových vzorcích reprezentujících porézní médium (hořký pískovec). Vzorky byly nasyceny ropou (ložisko Hrušky) a byly podrobně charakterizovány (minerologické složení, porozita a propustnosti pro vodu a spCO₂).

Při experimentech na vzorku hořického pískovce nasyceného ropou bylo pozorováno snížení propustnosti pro vodu v porovnání s propustností vzorku nenasyčeného ropou. Při měření se superkritickým CO₂ se propustnost vzorku nasyceného ropou zvýšila, což potvrzuje mobilizaci ropy v pórovém prostoru; zároveň však bylo pozorováno, že tlaková diference zůstává stále záporná i po natlakování aparatury a zvýšení průtoku, což bylo způsobeno ucpáním ventilů čerpadla ropou. Po vyčištění ventilů a jejich zpětné instalaci došlo při spuštění čerpání k opětovné ztrátě jejich funkce téměř

okamžitě. Měření bylo proto v této fázi ukončeno; následně byly posouzeny možnosti řešení vzniklého problému, které jsou v zásadě následující:

- Pro čerpání použít pumpu s jiným typem zpětných ventilů, kterým nevedí znečištění ropnými látkami, popř. použít pumpu s jiným principem čerpání.
 - Použít jiný typ filtrů, které ropnou fázi účinně zastaví; v takovém případě je však nutno upravit aparaturu tak, aby bylo možno ropnou fázi separovat, protože jinak by hrozilo ucpání filtrů a zneprůchodnění aparatury.
 - Použít jiné uspořádání aparatury, nejlépe neuzavřené, aby nedocházelo ke koloběhu znečištěného média.
- Vzhledem k tomu, že uvedená opatření přesahovala finanční i časové možnosti partnera ÚJV v rámci projektu, byla stávající aparatura vyhodnocena jako nevhodná pro práci se vzorky nasycenými ropnými produkty a další experimenty už nebyly realizovány.

8.2 Metodický výzkum v oblasti reaktivačního potenciálu zlomů

Posouzení reaktivačního potenciálu zlomů má velký praktický význam při studiu míst s významnými změnami izotropní složky napětí v horninovém prostředí, mezi něž patří i úložiště CO₂.

Stabilita křehkých poruch závisí jednak na působícím napětovém poli, jednak na orientaci a mechanických vlastnostech křehké poruchy (na kohezi a koeficientu tření). „Snadnost“ reaktivace zlomové plochy tedy významně závisí na její orientaci v prostoru. Při dostatečné znalosti ostatních parametrů (napětové pole a mechanické vlastnosti hornin a křehkých poruch) je tuto „snadnost“ reaktivace možné kvantifikovat pomocí parametru reaktivačního potenciálu. Úplně určení reaktivačního potenciálu vyžaduje (mimo jiné) znalost všech šesti nezávislých složek tenzoru napětí. V některých případech je však možné použít relativní formu reaktivačního potenciálu, s jejíž pomocí lze aplikovat tuto metodiku i tehdy, jsou-li známy pouze čtyři nezávislé parametry tzv. redukovaného tenzoru napětí.

Cílem metodického studia výpočtů relativního reaktivačního potenciálu, realizovaného partnerem ÚFZ, bylo rozvinout metodiku relativního reaktivačního potenciálu, rozebrat její možná omezení plynoucí z případné nejistoty (nepřesnosti) vstupních parametrů a ověřit její použitelnost na modelových příkladech využívajících dostupná (vesměs publikovaná) data.

Definice relativního reaktivačního potenciálu D_r vychází z definice parametru DP_f , který udává rozdíl normálové složky napětí aktuálně působící na plochu zlomu a kritické hodnoty normálové složky napětí. Změna všesměrné složky napětí (tedy např. změna tlaku fluid spojená s vtláčením CO₂), která by překročila hodnotu parametru DP_f , by tak u dané zlomové struktury vedla k její reaktivaci. Relativní reaktivační potenciál D_r lze pak chápat jako relativní formu parametru DP_f :

$$\Delta_r = \frac{\Delta P_f - \Delta P_{f-\min}}{\Delta P_{f-\max} - \Delta P_{f-\min}}$$

Pro zlomy s nejmenší hodnotou parametru DP_f (tedy pro zlomy nejvíce náchylné k případné reaktivaci) nabývá parametr D_r hodnoty 0, pro zlomy s největší hodnotou parametru DP_f (tedy pro zlomy s nejvyšší stabilitou v daném napětovém poli) je parametr D_r roven hodnotě 1.

V rámci metodického výzkumu byl proveden podrobný rozbor matematických rovnic určujících závislost parametru relativního reaktivačního potenciálu D_r na všech vstupních hodnotách popisujících napětové pole, mechanické vlastnosti plochy zlomu a její orientaci. Byly provedeny matematické důkazy, že relativní reaktivační potenciál D_r závisí pouze na sedmi vstupních parametrech, kterými jsou: čtyři parametry redukovaného tenzoru napětí (tři parametry popisující orientaci hlavních os napětí a Lodeho parametr), dva parametry popisující orientaci plochy zlomu (směr a sklon normály plochy) a koeficient tření. Na rozdíl od parametru DP_f nezávisí relativní forma (D_r) kupříkladu na rozdílu maximálního a minimálního hlavního napětí či na kohezi.

Dále se rozbor matematických vztahů převedených do souřadné soustavy spojené s orientací hlavních os napětí (čímž byl počet proměnných redukován na čtyři: Lodeho parametr L , směr α a sklon ϕ normály plochy a koeficient tření μ) soustředil na odvození přímých vztahů pro určení minim a maxim funkce $D_r(L, \alpha, \phi, \mu)$, které pak umožnily snadno vyšetřovat míru změn relativního koeficientu D_r při různých velkých změnách vstupních parametrů. Byla tak kvantifikována míra neurčitosti hodnoty D_r v závislosti na neurčitostech jednotlivých vstupních hodnot, přičemž tuto míru neurčitosti je možné snadno aplikovat také na původní („absolutní“) parametr DP_f .

Zjištěné obecné závislosti popisující velikost relativního reaktivačního parametru D_r i jeho neurčitosti byly pro názornost aplikovány na dvou modelových příkla-

dech. Rešerší publikovaných dat byly shromážděny dostupné údaje o orientacích hlavních os recentního napětí v širším prostoru styku Východních Alp a Západních Karpat, ve kterém je situováno také ložisko LBr-1. Data o orientacích napětových os vychází zejména z měření breakoutů ve vrtech a z napětové analýzy fokálních mechanismů, přičemž nejbližší regiony, pro které byla získána dostatečná napětová data, jsou představovány regiony Malých Karpat a rakouské části Vídeňské pánve.

Protože výpočty relativního reaktivačního potenciálu D_r vyžadují znalost alespoň čtyř parametrů redukovaného tenzoru napětí, které informace z breakoutů bez dodatečných studií neposkytují, byly další kroky metodické studie relativního reaktivačního potenciálu v prostoru Malých Karpat a jižní části Vídeňské pánve opřeny o výsledky napětových analýz fokálních mechanismů. Hodnoty redukovaných tenzorů napětí použitých ke klasifikaci zlomů tak jsou platné právě jen pro regiony Malých Karpat a jižní části Vídeňské pánve, a právě pro hloubky hypocenter zde sledovaných přirozených zemětřesení (cca 5 až 15 km). Vzhledem ke zjištěné vysoké heterogenitě parametrů napětového pole (a to nejen laterální, ale i vertikální) v celém prostoru styku Východních Alp a Západních Karpat je aproximace parametrů napětí do jiných hloubek a jiných regionů problematická. Rozhodně je nelze přímo použít na samotné ložisko LBr-1, na kterém mohou být lokální napětové podmínky významně odlišné. Pro účely obecného metodického studia však aplikace metody relativního reaktivačního potenciálu na zmíněných modelových příkladech názorně ukázala některé zásadní poznatky.

Provedené metodické studie výpočtů hodnot D_r a DP_f i modelové aplikace v regionech Malých Karpat a jižní části Vídeňské pánve jasně ukázaly, že zanedbání vlivu možných chyb vstupních hodnot může vést k významnému podhodnocení rizik reaktivace u některých segmentů sledovaných zlomových systémů. Vzhledem k tomu, že v měřících lokalitách či větších lze možné rozmezí hodnot koeficientu tření μ v horninovém prostředí významně zúžit již jen podle obecného charakteru zlomové struktury, je dopad neurčitosti koeficientu tření na neurčitost relativního reaktivačního parametru D_r poměrně malý. Ale již zohlednění běžných středních chyb orientací hlavních os napětí a Lodeho parametru se na výsledných hodnotách D_r a DP_f a tím i na jejich použití pro klasifikaci stability zlomů, projevuje významným způsobem a pro skutečně věrohodnou klasifikaci zlomů je nutné vzít tyto střední chyby (a případně i další neurčitosti) v úvahu.

Z výsledků studia relativního reaktivačního potenciálu a dalších parametrů reaktivace vyplývá, že metodika relativního reaktivačního potenciálu umožňuje provést relativní klasifikaci stability zlomů s dostatečnou vypočítací hodnotou tam, kde nejsou k dispozici dostatečně věrohodné údaje o úplném tenzoru napětí (zejména

o velikosti poloměru Mohrovy kružnice, velikosti vertikálního napětí, popřípadě tlaku fluid). V každém případě však prakticky použitelná klasifikace stability zlomů vyžaduje velmi dobrou znalost orientace hlavních směrů napětí a Lodeho parametru v místě, pro které je klasifikace počítána. Nemůže se proto opírat jen o aproximace parametrů napětového pole odvozené z jiných lokalit (či dokonce jiných regionů), ale musí být založena na napětových datech získaných v daném místě.

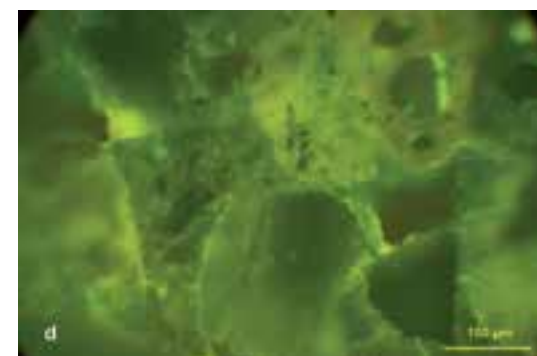
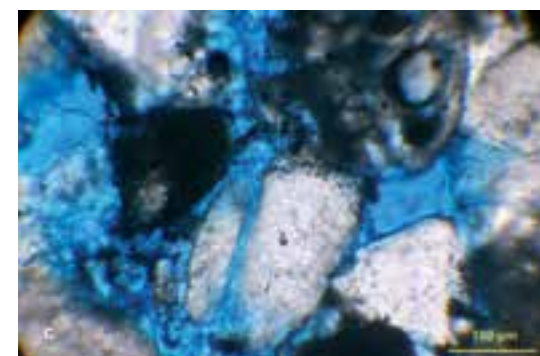
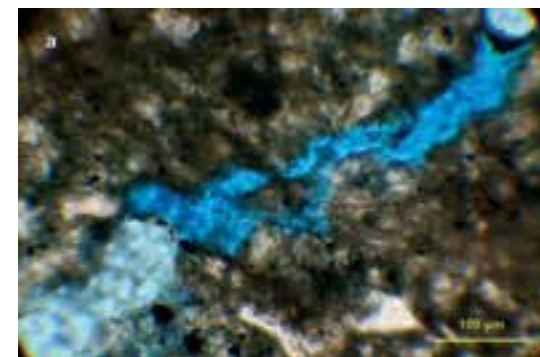
Výsledky výzkumu jsou podrobně prezentovány v projektovém výstupu V7.3.

8.3 Metodický výzkum v oblasti mineralogie tmelů

Cílem tohoto dílčího úkolu byl vývoj a testování nové metodiky analýzy jílových minerálů v pórovém prostředí kolektorských hornin a v těsnících horninách. Z 208 shromážděných vzorků písčitých i jílovitých hornin byla pomocí ultrazvuku a centrifugace vyseparována zrnitostní frakce pod 2 mikrometry. V jiných aktivitách tohoto projektu bylo zkoumáno celkové složení hornin, v kterém dominují horninotvorné minerály, např. křemen, živce a slídy (viz např. výstup V1.7). Naším cílem bylo identifikovat a v relativních poměrech kvantifikovat novotvořené minerály vznikající při reakci hornina – voda. Práce navazují na výsledky z rakouské části vídeňské pánve (Gier et al. 2008) a další práce na téma cementace pískovců (Worden – Morad 2003; McCarthy et al. 2009; Morad et al. 2010; Libbey et al. 2013 a Xi et al. 2015).

V rámci výzkumu byly provedeny tyto typy analýz:

- 1) lementární analýza minerálního a organického uhlíku a síry v celkové hornině: TIC – celkový minerální uhlík („Total Inorganic Carbon“), z této hodnoty byl stechiometricky vypočten obsah CaCO₃; TOC – celkový organický uhlík („Total Organic Carbon“); TS – celková síra („Total Sulphur“). Vše na vzorcích kolektorských hornin a vyseparované jílové frakce potenciálních kolektorů LBr-1 spodního, středního a svrchního badenu a také ve 2*13 vzorcích před a po experimentech se superkritickým CO₂.
- 2) Roentgen-difrakční analýzy (XRD – „X-Ray Diffraction Analysis“) orientovaných preparátů v přírodním stavu a po sycení etylén-glykolem vyseparované jílové frakce, jejichž výsledkem je semikvantitativní fázové složení tmelů.
- 3) Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM – „Scanning Electron Microscopy“) s energiově dispersní spektroskopii (EDS – „Energy Dispersive Spectroscopy“) nedrcených horninových úlomků pokovených paládiem. Výsledkem je dokumentace tvarů minerálů cementu zarůstajících pórový prostor v pískovcích.
- 4) Mikroskopie v procházejícím, odraženém a fluorescenčním světle preparátů pískovců impregnovaných epoxidovou pryskyřicí s modrým barvivem (obr. 8-2). V nejmenší frakci pod 2 μm v pískovcích byly zjištěny následující minerály podílející se na cementaci pórového prostoru: expandující illit-smektit (IS), kaolinit (K), detritický illit (Id), z dalších minerálů se jedná o jemnozrnný kalcit (Ca), dolomit (D), siderit (Sd) a sekundární křemen (Q).



Obr. 8-2 Pískovce sycené modrým epoxidem pro zviditelnění pórů: vlevo v procházejícím světle, vpravo ve fluorescenčním světle: a, b – vzorek Hr-43, 1565 m; c, d – vzorek Hr-197, 1075 m

Znalost složení horninových tmelů je velmi důležitá při hodnocení a modelové predikci pohybu fluid v ložisku, resp. úložišti. Výsledky zdokonalené metodiky byly podrobně popsány ve výstupu V7.4 a budou využity především v dalších fázích realizace pilotního projektu ukládání CO₂.

8.4 Metodický výzkum v oblasti monitorování uloženého CO₂ a případných úniků z úložiště

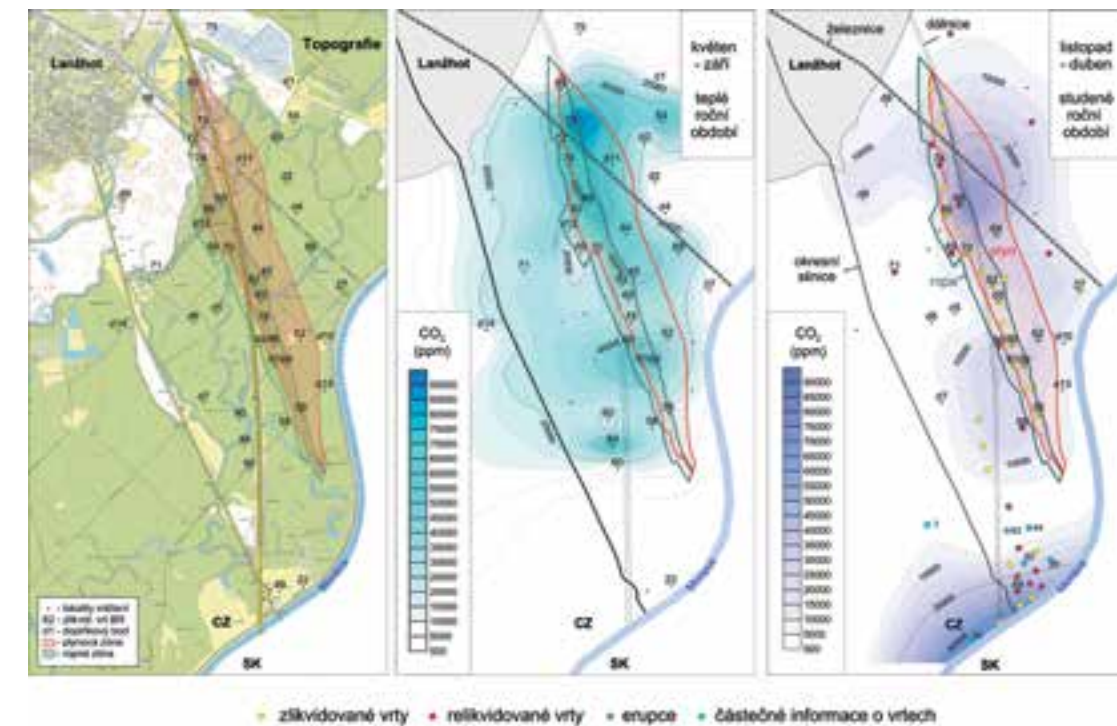
Monitorování hermetičnosti úložního komplexu CO₂ a možných úniků CO₂ vyžaduje dobře připravenou metodiku povrchových i podpovrchových měření přizpůsobenou pro konkrétní lokalitu. Její významnou součástí je atmogeochemický monitoring. V rámci projektu REPP-CO₂ bylo při jeho realizaci na lokalitě LBr-1 získáno:

- 1 630 jednorázových primárních údajů o složení půdního vzduchu (CO₂ a metan s použitím přenosného přístroje Ecoprobe5),
- 5 010 měření novou technologií automatických měřicích stanic IGS, umístěných mělce pod povrchem a provozovaných po dobu 1 roku,
- 52 vzorků půdního vzduchu, na nichž byly provedeny kontrolní analýzy metodou plynové chromatografie (GC-FID) a
- 28 vzorků metanu a CO₂ s provedeným izotopovým rozbohem δ¹³C.

Získané zkušenosti lze shrnout ve formě doporučení pro základní („base-line“) monitoring před zahájením

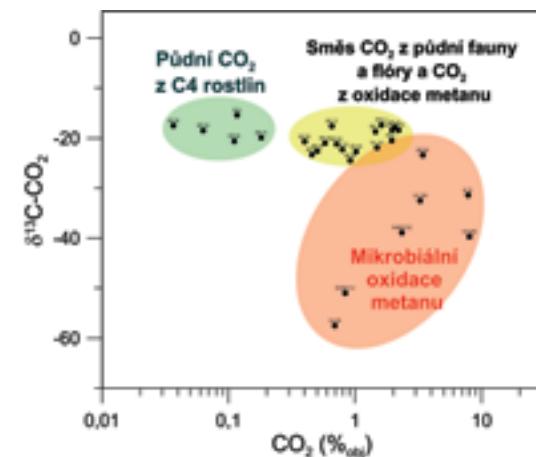
ukládání CO₂ a následnou fází monitoringu v období injektáže do těchto základních bodů:

- jednorázová měření na místě provádět přenosným zařízením ve zvolené síti měřicích bodů; výsledky znázorňovat průběžně do vrstevnicových map (obr. 8-3) a provádět jejich srovnání s předchozími časovými intervaly; aktualizovat jak celkové mapy sledovaného území, tak i dílčí mapy okolí aktivních (injekčních, monitorovacích) a likvidovaných vrtů (v ploše ca. 25 x 25 m);
- vyhodnocovat homogenitu dat, trendy a sezónní změny;
- měření provádět nejdříve orientačně na povrchu terénu, v přirozeném stavu; v místě zvýšeného obsahu sledovaných složek (CO₂ a metanu) zarazit půdní sondu (např. Eijkelkamp) do hloubky ca 80 cm, utěsnit otvor a po asi 5 minutách změřit složení půdního vzduchu v hloubce 85 a 35 cm; měření zopakovat po 2–5 minutách;
- automatické stanice situovat do míst nad likvidovanými vrtů a v okolí monitorovacích vrtů, na základě orientačního měření přenosným zařízením; měřená data snímat v pravidelných časových intervalech; kontrolovat stav baterií;
- zohlednit vliv meteorologických charakteristik na změny ve složení půdního vzduchu – z analýzy vyplývá silný vliv náhlého poklesu barometrického tlaku na vzestup měřeného obsahu CO₂ se zpožděním asi 10 hodin; v případě metanu se tento fenomén projevuje jen omezeně, pravděpodobně z důvodu velmi nízkých obsahů metanu v půdním vzduchu na lokalitě LBr-1;



Obr. 8-3 (a) Mapa lokality s vyznačením situace měřicích stanic; (b) mapa izolinií obsahu CO₂ sestavená na základě jednorázových měření složení půdního vzduchu v létě 2016; (c) stejná mapa pro chladné roční období 2016.

Obr. 8-4
Charakteristika typů CO₂ v půdním vzduchu na základě obsahu (CO₂ %obj) a izotopového složení uhlíku (δ13C-CO₂). Rozlišeny jsou tři genetické typy: půdní CO₂ z metabolismu především C4-rostlin, CO₂ z mikrobiální oxidace metanu a směs uvedených dvou typů.



- brát v úvahu sezonní změny složení půdního vzduchu a rozdíly v koncentracích plynů nad úložním komplexem a mimo něj – z provedených měření vyplývá:
 - asi desetinásobné zvýšení přírodního pozadí CO₂ v půdním vzduchu v teplém období květen-září ve srovnání s chladným obdobím listopad-duben,
 - asi dvoji- až trojnásobné zvýšení obsahu CO₂ nad vytěženým ložiskem ropy a plynu vůči oblasti mimo vytěžené ložisko;
- měření v terénu doplňovat odběry vzorků půdního vzduchu i plynu z pozorovacích sond a rozborů chemického a izotopového složení uhlíku v CO₂ a metanu – získané výsledky ukazují na tři genetické typy CO₂ na lokalitě LBr-1 a přilehlé části Vídeňské pánve (obr. 8-4):
 - CO₂ z metabolismu fauny a flóry, zejména C4-rostlin,
 - CO₂ z mikrobiální oxidace metanu,
 - směs uvedených typů.

Výsledky popsaného metodického výzkumu jsou podrobně zpracovány v projektovém výstupu V7.5.

8.5 Metodický výzkum v oblasti snižování rizik a zvyšování bezpečnosti úložiště – výzkum odolnosti materiálů používaných k vystrojení vrtů

Integrita vrtu je jedním z nejdůležitějších činitelů, které přispívají k omezení rizika úniku CO₂ z podzemního úložiště. Stvol vrtu totiž představuje při geologickém ukládání nejpravděpodobnější cestu, kterou může CO₂ z úložiště unikat. Potenciální migrační cesty se vyskytují jak u starých, zlikvidovaných, tak u aktivních zapažených vrtů. Především jsou to možné úniky podél rozhraní materiálů, např. mezi cementem a vnější plochou pažnic, mezi cementem a vnitřní plochou pažnic, prostorem na styku cementu a horniny tvořící stěnu vrtu, a dále také v samotném materiálu, především vlivem nespojitostí, např. skrze kapiláry v cementu, skrz proražené nebo zkorodované pažnice, nebo prasklinami v cementaci mezikruží.

V rámci projektu REPP-CO₂ byl v této souvislosti na pracovištích VŠB realizován metodický výzkum, který

se zaměřil na jednotlivé komponenty vystrojení vrtů a jejich možné ovlivnění dlouhodobým působením CO₂.

Vliv agresivního prostředí na cementaci vrtů

Celistvost a propustnost cementu v mezikruží aktivních vrtů a v cementových mostcích zlikvidovaných vrtů je zásadním parametrem, který ovlivňuje efektivitu utěsnění proti únikům tekutin z horninového prostředí. V případě injektování a ukládání CO₂ je třeba, aby si cement použitý k utěsnění vrtu dokázal zachovat velmi nízkou permeabilitu po velmi dlouhé období za působení CO₂ při ložiskových p-T podmínkách. Při dlouhodobém uložení CO₂ se použitý materiál dostává do kontaktu se superkritickým CO₂ a solankou za zvýšeného tlaku a teploty a nízkého pH. Ke korozi pak dochází hlavně podél kontaktu cement/hornina a v menším rozsahu i v cementové matrixu. Vady v cementovém prstenci a únikové kanálky pro migraci způsobují nárůst kontaktního času a zvětšení oblasti kontaktu mezi korozivní tekutinou a cementem, čímž zesilují korozivní proces.

Za účelem výzkumu těchto vlivů byla v laboratořích VŠB provedena sada experimentů s využitím reakční komory RK-1, která umožňuje realizovat zkoušky za rezervoárových teplotních a tlakových podmínek.

Pro vlastní laboratorní pokusy byly zvoleny 3 typy cementových směsí, které se v lokální praxi běžně užívají pro cementaci mezikruží, úhybových mostků aj. Jedná se o tyto typy cementových směsí:

- klasická cementová směs,
- cementová směs s urychlovačem tuhnutí,
- cementová směs se zpomalovačem tuhnutí.

Pro každý z těchto typů cementových směsí byly připraveny tři sady po 4 vzorcích krychlového tvaru o délce strany 5 cm. Každá sada pak byla po dobu 80 dní vystavena předpokládaným specifickým vrtovým podmínkám ve dvou variantách (ložisková voda a ložisková voda + CO₂), a pro srovnání také inertnímu prostředí N₂. Pro experimenty byl použit tlak 7,5 MPa a teplota 35 °C. Po ukončení testů byly vzorky zkoumány pomocí práškové RTG difrakční analýzy a elektronové mikroskopie a vyhodnoceny z hlediska pevnostních charakteristik (zkouška pevnosti v prostém tlaku); vybrané vzorky byly rovněž rentgenovány.

Analýzy neprokázaly vliv fluid na fázové složení vzorků a jejich mikrostrukturu; byl ovšem prokázán vliv fluid na jejich pevnostní charakteristiku – vzorky vystavené působení směsi ložiskové vody a CO₂ vykazují výrazně nižší (i když stále relativně vysoké) hodnoty pevnosti v prostém tlaku ve srovnání se vzorky vystavenými pouze působení ložiskové vody.

Na základě popsaných experimentálních výsledků a souběžně provedené rešerše mezinárodní odborné literatury byla na závěr formulována metodická doporučení pro zásady cementace v korozivním vrtovém prostředí za přítomnosti CO₂:

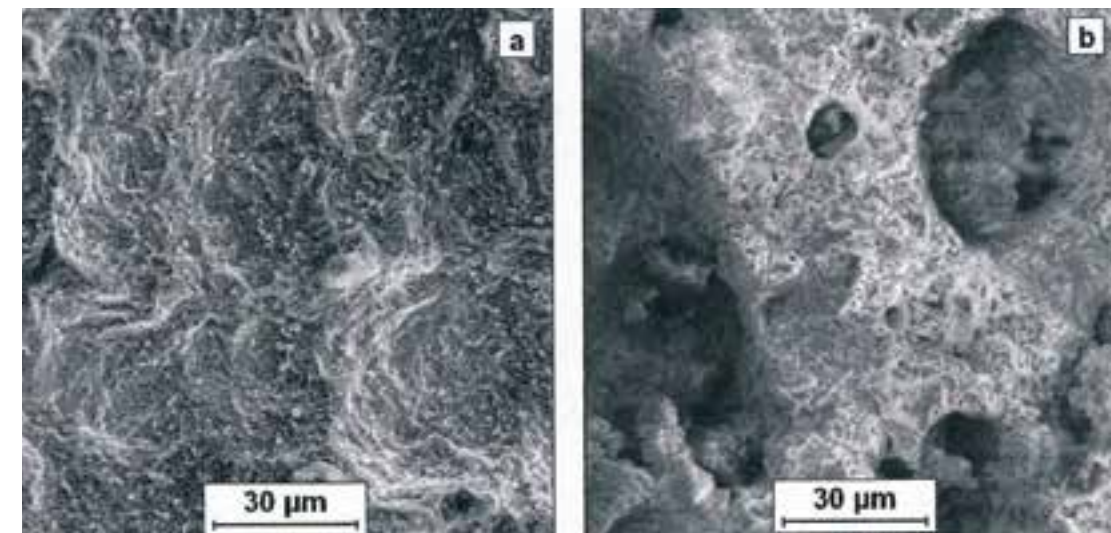
- **Vytvoření vhodného cementačního postupu pro úspěšnou primární cementaci.** To vyžaduje správně připravenou sondu a patřičně navrženou cementovou směs pro dané vrtové podmínky. Je třeba použít vhodné technické prostředky jako centralizované trubky a vhodné vrtné soupravy v kombinaci s využitím simulačního softwaru pro proces čerpání cementové směsi (užitečné pro maximalizování efektivního vytěsnění výplachu).
- **Zlepšení cementové vazby s horninou a redukce permeability horninového prostředí.** Podle literatury (např. Newhall 2006) lze cementovou vazbu zlepšit pomocí „předplachu“ křemičitanem sodným.
- **Navržení cementace s vyhovujícími mechanickými vlastnostmi.** Matematické vrtově-napětové simulace mohou pomoci predikovat, zda cementový prsteneček bude odolávat vyvolaným tažným silám a stlačitelností vyvolané změnou vrtových podmínek, které mohou zkrátit životnost injektážní sondy.
- **Užití upravených cementů,** které potlačí veškeré očekávané korozivní vlivy. Úprava cementů by se měla odvíjet od znalosti chemického složení tekutin ve vrtu a možných injekčních operací s korozivními tekutinami (např. CO₂). Užití API cementů je všeobecně doporučováno ke splnění alespoň minimálních kvalitativních standardů. Snižování obsahu C3A zlepšuje sulfátovou odolnost. Portlandit je slabinou cementové směsi a musí být minimalizován. Je prokázáno, že CO₂ přeměňuje portlandit na uhličitan vápenatý, který dočasně těsní cementové póry. Nicméně v průběhu chemických reakcí se portlandit bude snadněji louhovat ven z cementového matrixu a bude způsobovat destruktivní expanzi. Studie ukazují, že cementová koroze způsobená pouze reakcí CO₂ není sama o sobě velkým rizikem, ale urychluje v přítomnosti jiných faktorů další typy koroze. Eliminace portlanditu a přísad oxidu křemičitého proto pomáhá mírnit korozivní reakce.

Výzkum kovových materiálů používaných pro vystrojení sond

U provozních sond působí CO₂ korozivně na součásti, které s ním přicházejí do kontaktu, což jsou zejména stupačky, pažnice a filtry, které se nacházejí pod zapakovanou částí těžební pažnicové kolony. Koroze kovového vystrojení vtláčecích sond v prostředí CO₂ je závislá na pH, tlaku a teplotě. S rostoucí teplotou se rozpustnost CO₂ ve vodě rapidně snižuje, s rostoucím tlakem zvyšuje (např. při 5 MPa je cca 5 x vyšší než při 0,1 MPa) a s rostoucím pH snižuje. Koroze vystrojení tak může být omezena zejména použitím nekorozivních materiálů, jako chromem vysoce legovaná ocel, nebo zainjektováním inhibitoru koroze v případě použití uhlíkové oceli.

V rámci provedeného výzkumu byly na pracovištích VŠB připraveny materiálové vzorky ze součástí vystrojení vrtů běžně používaných v provozní praxi – pažnic, stupeček, vrtných tyčí a pakru. Vzorky byly umístěny jedné z cel aparatury RK-1, vyložované vnitřním nerezovým ochranným válcem. Reakční prostředí bylo tvořeno laboratorně vytvořenou ložiskovou vodou odpovídající té, která se vyskytuje na ložisku LBr-1, a oxidem uhličitým. Analyzované materiálové vzorky byly ponechány v reakčním prostředí po dobu 236 dnů. Poté byly podrobeny metalografické analýze na specializovaném pracovišti Politechniky Śląské v Katovicích, kde byly zkoumány změny jejich vlastností ve srovnání se stavem před experimentem (obr. 8-5).

Na vzorcích nebyly pozorovány žádné podstatné změny ve fázovém složení, morfologii vnitřních struktur jednotlivých složek ani v nárůstu nekovových příměsí. Dlouhodobé působení CO₂ za rezervoárových p-T podmínek se však projevilo zvýšenou mírou koroze na povrchu vzorků, přičemž nejmenší korozivní napadení bylo zaznamenáno u vzorku pažnice. Z výsledků experimentů vyplývá, že při geologickém ukládání CO₂



Obr. 8-5 Povrch vzorku pažnice před experimentem (a) a po expozici CO₂ (b).

(realizovaném v časovém horizontu prvních stovek dní) by injektáži pravděpodobně mohlo být ponecháno původní přípočkové vystrojení sond (pažnice, filtry, stu-pačky, pakry).

Na základě výše uvedených poznatků byl v závěru projektu realizován rovněž dlouhodobý experiment

zaměřený na zkoumání vlivů reakčního prostředí na kontakty hornina-cement-pažnice, který dále rozšířil spektrum získaných znalostí.

Provedené experimenty, jejich výsledky a výsledná metodická doporučení jsou podrobně popsány v projektových výstupech V7.6 a V7.7.

LITERATURA

- Gier, S., Worden, R. H., Johns, W. D., & Kurzweil, H. (2008): Diagenesis and reservoir quality of Miocene sandstones in the Vienna Basin, Austria. – *Marine and Petroleum Geology*, 25(8), 681–695. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.06.001>
- Libbey, R. B., Longstaffe, F. J., & Flemming, R. L. (2013): Clay Mineralogy, Oxygen Isotope Geochemistry, and Water/rock Ratio Estimates, Te Mihi Area, Wairakei Geothermal Field, New Zealand. – *Clays and Clay Minerals*, 61(3), 204–217. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2013.0610304>
- McCarty, D. K., Sakharov, B. A., & Drits, V. A. (2009): New insights into smectite illitization: A zoned K-bentonite revisited. – *American Mineralogist*, 94(11–12), 1653–1671. <https://doi.org/10.2138/am.2009.3260>
- Morad, S., Al-Ramadan, K., Ketzer, J. M., & De Ros, L. F. (2010): The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy. – *AAPG Bulletin*, 94(8), 1267–1309. <https://doi.org/10.1306/04211009178>
- Newhall, C. (2006): Improving cement bond in the Appalachian Basin with adjustments to preflush and spacer design. SPE Paper 104576-MS. – SPE Eastern Regional Meeting, 11–13 October 2006, Canton, Ohio, USA.
- Xi, K., Cao, Y., Jähren, J., Zhu, R., Bjørlykke, K., Zhang, X., Hellevang, H. (2015): Quartz cement and its origin in tight sandstone reservoirs of the Cretaceous Quantou formation in the southern Songliao basin, China. – *Marine and Petroleum Geology*, 66(September), 748–763. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.017>
- Worden, R. H., & Morad, S. (2003): Clay Minerals in Sandstones: Controls on Formation, Distribution and Evolution. In *Clay Mineral Cements in Sandstones* (pp. 1–41). – Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781444304336.ch1>

SEZNAM VÝSTUPŮ AKTIVITY 7

- V7.1 Zpráva – metodika dynamických experimentů se spCO₂ pro vzorky nasycené ropnými produkty
- V7.2 Shromáždění dostupných údajů o orientaci hlavních os recentního napětí ve sledovaném regionu a výpočty hodnot relativního reaktivačního potenciálu na základě dostupných údajů o orientaci napětí – dílčí zpráva
- V7.3 Závěrečná zpráva o provedeném výzkumu s vyhodnocením výpočtů relativního reaktivačního potenciálu zlomů
- V7.4 Zpráva – metodika výzkumu mineralogie horninových tmelů
- V7.5 Zpráva o metodickém výzkumu v oblasti monitorování uloženého CO₂
- V7.6 Vyhodnocení vlivu CO₂ na vystrojení vtlačecích sond (cement, pažnice, pakr, tyče) – textová zpráva
- V7.7 Vyhodnocení vlivu CO₂ na kontakty hornina–cement–pažnice – textová zpráva

9. Publicita a šíření informací

Publicita a šíření informací byly náplní projektové Aktivity 8. Jejím hlavním cílem bylo zpřístupnit ve srozumitelné a žádané formě informace o projektu REPP-CO₂ a jeho výsledky široké odborné i laické veřejnosti. Návržné osvětové a vzdělávací aktivity byly zaměřeny na rozvoj zájmu o problematiku CCS mezi laickou veřejností a studenty. Důležitou součástí aktivity byly odborné prezentace výsledků zaměřené na mezinárodní a domácí vědecko-výzkumnou komunitu a hlavní cílové skupiny projektu – zástupce státní správy zapojené do přípravy relevantních politik a výkonu regulatorních pravomocí a zástupce průmyslu z relevantních odvětví (energetika, průmysl s vysokými emisemi CO₂, geologie, těžba nerostných surovin).

Ještě před zahájením projektu byl v souladu s pravidly Norských fondů (Communication and design manual) zpracován Plán publicity, který se stal hlavním řídicím dokumentem pro realizaci Aktivity 8. Bezprostředně po zahájení projektu byly pro podporu realizace naplánovaných aktivit ve Vydavatelství ČGS vytvořeny grafické materiály, jako je logo, jmenovky, šablona prezentace ve formátu MS PowerPoint, šablony dokumentů, informační poster atd. Tyto materiály pak byly pro účely publicity a šíření informací důsledně využívány v celém průběhu projektu.

9.1 Informační website

Na adrese <http://www.geology.cz/repp-co2> byl v úvodu roku 2015 zprovozněn web projektu REPP-CO₂ (obr. 9-1). Web je realizován v prostředí Oracle iAS 10g – Oracle Portal; je rozdělen na část přístupnou veřejnosti a interní část, která je přístupná jen řešitelskému týmu. Veřejná část má za cíl poskytnout maximum veřejných informací o projektu samotném i o průběhu jeho řešení. Obsahuje stránky „Aktuality“, „O projektu“, „Ke stažení“, „Partneři“, „Kontakty“ a „Zajímavé odkazy“. Web je dvojjazyčný; anglická verze je k dispozici na <http://www.geology.cz/repp-co2/english>.

Na webu byly pravidelně zveřejňovány zprávy o průběhu a výsledcích řešení projektu. V závěru projektu zde byly k dispozici informace o závěrečném projektovém workshopu a konferenci (viz kap. 9.5); projektový web v těchto případech sloužil i jako prostředek k online registraci pomocí registračního formuláře a jako informační místo pro účastníky zmíněných akcí. Po realizaci konference a workshopu byly na webu publikovány prezentace jednotlivých řečníků a dokumentační fotogalerie. Interní část webu byla intenzivně využívána pro sdílení a přenos dat a pracovních dokumentů.

Projektový web byl propojen s informačním portálem pro technologie CCS, který ČGS provozuje od roku 2006 a kde jsou průběžně publikovány novinky a informace



Obr. 9-1 Domovská stránka projektového webu REPP-CO₂ <http://www.geology.cz/repp-co2>.

o rozvoji technologií CCS v ČR i ve světě. V rámci projektu REPP-CO₂ byl tento informační portál inovován, opatřen novou grafikou, přesunut na novou adresu <http://www.geology.cz/ccs/> a rozšířen o vzdělávací část v záložce „Technologie CCS“. Jedná se o obsáhlý populárně-naučný text s množstvím ilustrativních obrázků vysvětlujících základní principy technologie CCS. Text je zpracovaný dle vzoru na webu Global CCS Institute a pro přehlednost je rozdělený na 5 podkapitol:

- Vliv CO₂ na změnu klimatu
- Zachytávání CO₂
- Přeprava CO₂
- Ukládání CO₂
- CCS v praxi.

Provoz informačního portálu pro technologie CCS bude ze strany ČGS zajištěn i po ukončení projektu REPP-CO₂.

9.2 Prezentace projektu a jeho výsledků na vhodných domácích a zahraničních událostech

V průběhu i po skončení realizace byl projekt REPP-CO₂ a jeho výsledky představen formou přednášek a posterů na řadě domácích i mezinárodních konferencí, workshopů a seminářů, včetně akcí s vysokým mezinárodním odborným kreditem (např. konference GHGT nebo EAGE). Odborné diskuze, zejména s kolegy z mezinárodní vědecko-výzkumné komunity, související s těmito prezentacemi, byly vítanou příležitostí pro výměnu znalostí a zkušeností či navázání nových výzkumných partnerství, ale zároveň poskytl i neocenitelnou zpět-

nou vazbu ohledně relevance a kvality řešených problémů a prezentovaných výsledků.

Seznam akcí s aktivní účastí zástupců projektu REPP-CO₂ a prezentacemi jeho výsledků zahrnuje tyto konference, workshopy a semináře:

- CLIMIT Summit, Oslo, 24. – 25. 2. 2015
- Energy developments and CCS in East and Central Europe – seminář v rámci konference CLIMIT Summit, Oslo, 25. 2. 2015
- Polish-Norwegian and Czech-Norwegian CCS projects supported by EEA and Norway Grants – norskopolsko-český seminář organizovaný Norwegian Research Council, Oslo, 26. 2. 2015
- Pilotní studie a průzkumy pro CCS technologie – zahajovací konferenci programu CZ08 Norských fondů 2009–2014, Praha, 8. 4. 2015
- ICCT 2015 – 3. mezinárodní chemicko-technologická konference (International Conference on Chemical Technology), Mikulov, 14. 4. 2015
- 10th CO₂GeoNet Open Forum, Benátky, 11.–12. 5. 2015
- EAGE 2015 – 77th Annual Conference and Exhibition of the European Association of Geoscientists and Engineers, Madrid, 1.–4. 6. 2015
- TCCS-8 – 8th Trondheim Conference on CO₂ Capture, Transport and Storage, Trondheim, 16.–18. 6. 2015
- Goldschmidt 2015, Praha, 16.–21. 8. 2015
- IMO2015 – International Meeting on Organic Geochemistry, Praha, 13.–18. 9. 2015
- Otevřený kongres České geologické společnosti a Slovenské geologickej spoločnosti, Mikulov, 14.–17. 10. 2015
- Seminář o možnostech aplikace technologie CCS (zachytávání a ukládání CO₂) v České republice, Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Praha, 15. 1. 2016
- Problematyka geosekwestracji CO₂ w Republice Czeskiej – odborný seminář Akademie Górniczo-Hutniczej, Krakov, 29. 1. 2016
- Zachycování a ukládání CO₂ – seminář v rámci 4. mezinárodní chemicko-technologická konference (International Conference on Chemical Technology), Mikulov, 26. 4. 2016
- 11th CO₂GeoNet Open Forum, Benátky, 9.–10. 5. 2016
- CO₂ storage pilot projects in Europe – workshop pořádaný projektem REPP-CO₂, přidružená akce konference Open Forum, Benátky, 11. 5. 2016
- EAGE 2016 – 78th Annual Conference and Exhibition of the European Association of Geoscientists and Engineers, Vídeň, 30. 5. – 2. 6. 2016
- Zachycování a ukládání CO₂ – sdílení znalostí a zkušeností – závěrečná konference projektu Norských fondů ShaKE, Praha, 15. 6. 2016
- Co-operation in Research and Development of Carbon Capture and Storage Technologies – česko-norský seminář spoluorganizovaný projektem REPP-CO₂, Oslo, 12. 10. 2016

- Zachytávání a ukládání CO₂ v podmínkách ČR – spolupráce České republiky a Norska – česko-norská konference spolupořádaná projektem REPP-CO₂, Praha, 7.–8. 11. 2016
 - GHGT-13 – 13th Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Lausanne, 14.–18. 11. 2016 (obr. 9-2)
 - Cooperation between forerunner and follower countries in CCS research: The example of Norway and the Czech Republic – seminář spoluorganizovaný projektem REPP-CO₂, přidružená akce konference GHGT-13, Lausanne, 14. 11. 2016
 - Provoz energetických zařízení v podmínkách připravované legislativy – seminář Hospodářské komory ČR, Praha, 15. 11. 2016
 - Improved Oil Recovery 2017 – sympóziu EAGE, Stavanger, 24.–27. 4. 2017
 - 12th CO₂GeoNet Open Forum, Benátky, 8.–9. 5. 2017
 - TCCS-8 – 8th Trondheim Conference on CO₂ Capture, Transport and Storage, Trondheim, 12.–14. 6. 2017.
- Celkově zástupci projektu na výše uvedených akcích prezentovali 40 přednášek a 11 posterů.

9.3 Publikace v odborné a populárně vědecké literatuře

V úvodním období projektu byly publikační aktivity zaměřeny na představení projektu a jeho cílů. Články tohoto typu vyšly v časopise Akademik (VŠB), v newsletteru Geo ENeRGY, vydávaném mezinárodní výzkumnou sítí ENeRG, a v recenzovaném odborném časopise Uhlí – Rudy – Geologický průzkum.

S postupem prací na řešení projektu se těžiště publikačních aktivit přesunulo k prezentaci projektových výsledků; tato aktivita byla zahájena v závěru projektu a pokračuje i po jeho oficiálním ukončení. Výsledky projektu REPP-CO₂ jsou jádrem publikace v impaktovaném odborném časopise Environmental Earth Sciences s názvem „Preliminary geochemical modeling of water–rock–gas interactions controlling CO₂ storage in the Badenian Aquifer within Czech Part of Vienna Basin“ autorů K. Labuse, P. Bujoka, M. Klempy, M. Porzera a D. Matyska (VŠB). Další články vyšly v časopise Przeglad geologiczny a ve sborníku XVIII. mezinárodní vědecko-technické konference New knowledge in the area of drilling, production, transport and storage of hydrocarbons, Podbanské 2016.

Na základě prezentací a posterů z konference GHGT-13 budou v průběhu roku 2017 v časopise Energy Procedia byly publikovány čtyři články s výsledky projektu REPP-CO₂:

- 3D geological model of potential CO₂ storage: Abandoned oil and gas field LBr-1 in the Vienna Basin (autoři J. Franců, M. Pereszlényi, O. Prokop, L. Jurenka, V. Hladík, O. Krejčí /ČGS/, F. Riis /IRIS/).
- LBr-1 – research CO₂ storage pilot in the Czech Republic (autoři V. Hladík, M. Pereszlényi, O. Krejčí, J. Franců

REPP
Vit Hladik^a, Roman Berenblyum^b, Miroslav Pereszlényi^b, Oldrich Krejci^a, Juraj Francu^a, Fridtjof Riis^b, Eric P. Ford^b, Lars Kollbotn^b, Alexey Khrulenko^b
^aCzech Geological Survey, branch Brno, Letňavská 22, 659 69 Brno, Czech Republic.
^bInternational Research Institute of Stavanger, Prof. Olav Hanssensveier 15, 4021 Stavanger, Norway

LBr-1 – RESEARCH CO₂ STORAGE PILOT IN THE CZECH REPUBLIC

13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-13, 14-18 November 2016, Lausanne, Switzerland

INTRODUCTION
 LBr-1 is a small depleted hydrocarbon field in the Czech part of the Vienna Basin. Within REPP-CO₂, a Czech-Norwegian research project, a consortium of 7 partners is making the first steps towards obtaining a storage permit and realization of CO₂ injection in future. The work includes collecting the necessary data; conducting laboratory investigations; constructing a three-dimensional geological model of the storage complex; developing dynamic models to be used for simulation of the CO₂ injection phase and post-injection ones; evaluating a risk analysis, and compiling a monitoring plan. Further project activities focus on methodological research of CO₂ geological storage, potential capacity building at Czech partner institutions, and knowledge dissemination.

STORAGE SITE
 The LBr-1 site, chosen as the storage pilot, was produced in 1960s-1970s. The field is situated in the Vienna Basin, in the south-eastern part of the Czech Republic (Fig. 1). The geological target for CO₂ storage is the Badenian (Badenian) oil- and gas-bearing sandstone sediments at a depth of ca. 1100m together with the adjacent aquifer. The productive sandstone beds are part of the LBr horizon (Middle Badenian). The reservoir represents a combination of a stratigraphic and tectonic trap, sealed by an impermeable clayey caprock.

BUILDING THE 3D GEOLOGICAL MODEL
 The newly built 3D geological model is based on re-evaluated well logs, core samples and new 3D seismic data interpretation as well as archival reports and publications. The age and quality of the archival data and core material caused complications in the data processing and interpretation.

DYNAMIC MODELLING
 A material balanced model was built in order to estimate aquifer properties and potential CO₂ storage volume based on the production history (Fig. 3). The aquifer properties (volume and productivity) were adjusted to match the observed reservoir pressures. Three cases (optimistic, reference, pessimistic) were developed to account for uncertainty in production data. Full field reservoir model was built based on new geology and laboratory study. The model was history matched and would be used to evaluate storage potential under three key scenarios: pure storage without pressure relief; pressure relief by water production; EOR (enhanced oil recovery), where storage is preceded with enhanced hydrocarbons production. Optimal injection strategy is evaluated.

RISK ANALYSIS
 The risk analysis of the LBr-1 field is based on the bow-tie approach to identify leakage causes and pathways, preventive and mitigating barriers and human operational and environmental consequences of different CO₂ leakage scenarios. The most important risk elements are more than 100 legacy exploration and production wells, 26 of them directly penetrating the target reservoir horizon (Fig. 4a). All wells have been abandoned at the end of the production (Fig. 4b), and some of them are currently subject of a re-abandonment project. The risk these wells represent for CO₂ storage, as well as the possibility to use the existing wells for CO₂ injection and/or monitoring were studied. A generalized approach to the methodology and the quantitative risk assessment is provided, including evaluations of flow capabilities along faults, leakage detection and prevention capabilities of the site, and environmental impact scenarios.

CONCLUSIONS
 The REPP-CO₂ project represents the first step in development of the LBr-1 site towards a research CO₂ storage pilot in the Czech Republic. Fundamental milestones of site assessment, site characterization, CO₂ injection simulation and risk analysis have been achieved, and plans for further stages of site development have been elaborated. The work is now continuing within the ENEOS project funded by the EC within the Horizon 2020 programme, with the final vision to start CO₂ injection around 2025.

ACKNOWLEDGEMENTS
 The REPP-CO₂ project is supported by a grant from Norway within the CCS Programme of Norway Grants 2009-2014. The authors would like to acknowledge more than 100 other project participants from their own and partner institutions for their contribution to the project and results presented here. Special thanks are given to IPRG, A.S. for provision of LBr-1 archive site data.

norway grants

Obr. 9-2 Poster „LBr-1 – Research CO₂ Storage Pilot in the Czech Republic, prezentovaný na mezinárodní konferenci GHGT-13 v Lausanne (listopad 2016).

/ČGS/, R. Berenblyum, F. Riis, E. P. Ford, L. Kollbotn, A. Khrulenko /IRIS/).

- REPP-CO₂: Equilibrium Modelling of CO₂-Rock-Brine Systems (autoři M. Klajmon, V. Havlová, R. Červinka, A. Mendoza /ÚJV/, J. Franců /ČGS/, R. Berenblyum, O. Arild /IRIS/).
- A comparison of FEP-analysis and barrier analysis for CO₂ leakage risk assessment on an abandoned Czech

oilfield (autoři O. Arild, E. P. Ford, H. P. Lohne, M. Mansouri Majoumerd /IRIS/, V. Havlová /ÚJV/).

Další aktivity směřující k publikaci výsledků projektu probíhají; vydání článků lze očekávat ve 2. pololetí roku 2017, popř. v roce 2018.

V závěrečném období projektu byl rovněž zpracován populárně naučný článek V. Hladíka a P. Maděry (ČGS) „Zachytávání a ukládání CO₂: cesta ke zmírnění změny

klimatu". Článek byl předán do redakce časopisu Vesmír, který patří k nejvýznamnějším médiím pro popularizaci vědy v Česku. Dle sjednané dohody bude článek vydán v závislosti na tematickém zaměření jednotlivých čísel časopisu na podzim roku 2017.

Všechny publikační aktivity byly průběžně zaznamenávány v sekci „Aktuality“ na projektovém webu <http://www.geology.cz/repp-co2>; kopie přednášek, posterů a publikací jsou soustředěny v sekci „Ke stažení“. Přehled realizovaných publikačních aktivit je pak náplní projektového výstupu V8.4.

V závěru projektu byla zpracována Závěrečná zpráva projektu, která přehlednou formou na více než 100 stránkách shrnuje všechny hlavní dosažené výsledky – viz výstup V8.5.

9.4 Vzdělávací a osvětové aktivity

Vzdělávací a osvětové aktivity byly zaměřeny na zvýšení obecného povědomí odborné a laické veřejnosti o technologii CCS a jejím významu pro snížení emisí skleníkových plynů v rámci úsilí o zmírnění změny klimatu.

Přednášky

První aktivitou zaměřenou na zvyšování obecného povědomí odborné veřejnosti o technologii CCS byla přednáška koordinátora projektu V. Hladíka (ČGS) nazvaná „Technologie CCS: Budeme ji potřebovat?“ na 3. mezinárodní chemicko-technologické konferenci (International Conference on Chemical Technology – ICCT 2015) v Mikulově dne 14. dubna 2015. V létě 2015 přednesli pracovníci VŠB v rámci pravidelných seminářů Moravskoslezské hornické společnosti ČSVTS v Ostravě odbornou přednášku s názvem „Technika a technologie hloubení vrtů určených pro geosekvestraci CO₂“.

V rámci největšího vědeckého festivalu v ČR s názvem Týden vědy a techniky přednesl koordinátor projektu Vít Hladík prezentaci „Technologie CCS aneb S oxidem

uhlíčitým do podzemí!“. Přednáška určená pro širokou veřejnost se uskutečnila dne 9. 11. 2015 v budově Akademie věd České republiky. Hlavními tématy obsaženými v prezentaci byly:

- Role CO₂ ve změně klimatu
- Technologie CCS a její význam
- CCS ve světě
- Situace v ČR
- Ekonomické faktory.

Další „osvětové“ přednášky koordinátora projektu V. Hladíka (ČGS) zazněly na závěrečné konferenci projektu Norských fondů „Zachycování a ukládání CO₂ – sdílení znalostí a zkušeností“ v Praze 15. 6. 2016 („CCS v běhu času“) a na česko-norské konferenci „Zachytávání a ukládání CO₂ v podmínkách ČR – spolupráce České republiky a Norska“ v Praze 7. 11. 2016 („CCS v České republice /a ve světě“).

Pro posluchače univerzity třetího věku Hornicko-geologické fakulty VŠB-TUO v Ostravě se dne 15. 11. 2016 uskutečnila prezentace s názvem „Konstrukce a vystrojení sond pro geosekvestraci CO₂“ (obr. 9-3), kterou přenesl M. Klempa (VŠB).

Přednášky pro studenty

Přednáškové aktivity REPP-CO₂ byly zaměřeny na studenty geologických a příbuzných oborů. Na vysokých školách byly uspořádány tyto akce:

- přednáška na téma „Geosekvestrace CO₂“ pro studenty 4. ročníku oboru geologické inženýrství HGF VŠB-TU Ostrava dne 12. 5. 2015,
- přednáška na téma „Projekt geosekvestrace CO₂ v ČR“ pro studenty 1. ročníku doktorského studia Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu na Akademii Gorniczo-Hutniczej, Krakov, Polsko dne 29. 5. 2015,
- přednáška „Projekt geosekvestrace CO₂ v ČR“ pro studenty 4. ročníku dálkového studia Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu na Akademii Gorniczo-Hutniczej, Krakov, Polsko dne 30. 5. 2015,
- přednáška na téma „CCS neboli zachytávání a ukládání oxidu uhličitého“ pro studenty oboru Sociální a kulturní ekologie na Fakultě humanitních studií Univerzity Karlovy v Praze dne 2. 6. 2016,
- kurz „Zpracování seismických dat“ v rámci pravidelné výuky na Ústavu geologických věd Masarykovy Univerzity v Brně, který byl celý věnován praktickým otázkám seismologického monitoringu, připravený a realizovaný partnerem UFZ na jaře 2016,
- přednáška „Geochemická problematika ukládání CO₂ v kontextu České republiky“ pro studenty Přírodovědecké fakulty UK v Praze dne 18. 10. 2016,
- přednáška „Geologické ukládání CO₂“ pro studenty magisterského studia oboru užitá geofyzika na Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky Přírodovědecké fakulty UK v Praze dne 9. 11. 2016.

Díky zapojení partnerů VŠB, ČGS, UFZ a ÚJV se plánované množství přednášek podařilo výrazně překročit.



Obr. 9-3 Přednáška M. Klempy s názvem „Konstrukce a vystrojení sond pro geosekvestraci CO₂“ pro posluchače univerzity třetího věku na Hornicko-geologické fakultě VŠB-TUO.

Souhrnná zpráva o aktivitách zaměřených na studenty je náplní projektového výstupu V8.11.

Média

Pro potřeby médií byly v průběhu projektu vydány dvě tiskové zprávy. V 1. období projektu byla vydána zpráva s titulkem „Česká geologická služba připravuje výzkumný projekt geologického ukládání CO₂ v České republice“, informující média i veřejnost o přípravě výzkumného pilotního projektu geologického ukládání CO₂ v České republice. V den oficiálního ukončení řešení projektu byla vydána druhá tisková zpráva s názvem „Příprava skončila úspěšně, pilotní projekt ukládání CO₂ v České republice může pokračovat“. Tato zpráva informuje o oficiálním ukončení řešení projektu REPP-CO₂ a hlavních dosažených výsledcích. K distribuci tiskových zpráv byly využity komunikační kanály ČGS a ostatních partnerů; zprávy byly také zveřejněny na projektovém webu.

Dne 22. 12. 2015 poskytl koordinátor projektu V. Hladík (ČGS) krátký rozhovor do vysílání celoplošné rozhlasové stanice Český rozhlas Plus. Rozhovor se týkal technologie CCS v souvislosti s vládním přijetím novely zákona č. 85/2012 Sb., o ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur.

Newsletter

V průběhu projektu byla publikována celkem tři čísla projektového newsletteru. První číslo z března 2015 seznámilo čtenáře s celkovým významem projektu i s jeho očekávanými přínosy, s dílčími cíli a strukturou jednotlivých projektových aktivit. Newsletter č. 2 vyšel v dubnu 2016; jeho náplní byly informace o průběhu projektu, dílčích výsledcích a realizovaných osvětových aktivitách, jakož i představení nejvýznamnějších projektových investic. Třetí newsletter byl vydán v listopadu 2016 a věnován výsledkům projektu, projektovému informačnímu systému a závěrečné projektové konferenci.

Newsletter byl prezentován v tištěné formě na přednáškách, konferencích a seminářích zaměřených na českou odbornou i laickou veřejnost, a to nejen v rámci projektu REPP-CO₂, ale i na těch, které organizovaly partnerské projekty programu CCS Norských fondů. Současně je newsletter v digitální formě dostupný i na webových stránkách projektu.

Vzdělávací materiály

Projekt REPP-CO₂ připravil vzdělávací materiály o technologii CCS a geologickém ukládání CO₂ v tištěné i digitální podobě. Příkladem tištěného materiálu je zpracovaný informační leták „Geologické ukládání CO₂“, který je českou verzí francouzského materiálu vydaného asociací Club CO₂ France (obr. 9-4). Leták byl přeložen z anglické verze do češtiny, aby populárně-naučné informace v něm obsažené mohly být šířeny mezi českou odbornou i laickou veřejnost. Národně zaměřené



informace v částech letáku, které byly původně cíleny na francouzskou veřejnost, byly přepracovány tak, aby odpovídaly českému kontextu. Leták byl vytištěn v nákladu 300 ks a rozdáván zájemcům v rámci projektových osvětových aktivit.

Mimo to byl v nákladu 110 ks realizován dotisk české verze 20stránkové informační brožury „Co to vlastně je geologické ukládání CO₂“. Jedná se o informační materiál, který vznikl v rámci evropské sítě excelence CO₂-GeoNet a je obsahově zaměřen na šíření srozumitelně podaných informací o ukládání CO₂. V rámci osvětových aktivit projektu byl využit stejně jako výše zmíněný leták. V elektronické verzi jsou oba materiály dostupné na webu projektu i na informačním portálu pro technologii CCS.

V průběhu projektu byla na portálu Svět geologie (<http://www.geology.cz/svet-geologie/poznaj-geologii/geologicka-temata/ukladani-co2>) připravena a spuštěna populárně naučná sekce Geologické ukládání CO₂. Sekce zapadá do celkového obsahu portálu, který prezentuje množství nejnovějších poznatků z oblasti věd o Zemi, jež jsou ve srozumitelné formě určeny dětem,

Obr. 9-4 Titulní stránka české verze osvětového letáku „Geologické ukládání CO₂“.

> Obr. 9-5 Konference „Zachytávání a ukládání CO₂ v podmínkách ČR – spolupráce České republiky a Norska“, Praha – Masarykova kolej, 7. listopad 2016 (foto ČVUT).

pedagogům i široké veřejnosti. V nové sekci Geologické ukládání CO₂ naleznou návštěvníci populárně naučné informace o technologiích CCS. Dozvědí se například, proč je CO₂ problém, jaké jsou cesty ke snížení emisí CO₂, co to je geologické ukládání CO₂ a jak probíhá. Sekce je doplněna odkazy na webové stránky projektu REPP-CO₂ a další relevantní informace.

Významným počinem bylo i zpracování české verze tří vzdělávacích videí vysvětlujících základy technologie CCS. Videá s názvy „Konkrétní fakta o zachytávání a ukládání CO₂“, „Zaostřeno na CCS“ a „Bezpečné úložiště: Uzavření uhlíkové smyčky“, která byla získána na základě dohody od Evropské technologické platformy ZEP, byla opatřena českým dabingem a umístěna do vzdělávací části informačního portálu pro technologie CCS (<http://www.geology.cz/ccs/technologie-ccs>) a do populárně naučné sekce Geologické ukládání CO₂ na portále Svět geologie (viz výše). Zároveň byla zpřístupněna na YouTube kanálu České geologické služby.

9.5 Závěrečný workshop a konference

Dne 12. října 2016 proběhl v Oslu česko-norský workshop „Spolupráce ve výzkumu a vývoji technologií zachytávání a ukládání CO₂“. Seminář byl organizován ve spolupráci projektu REPP-CO₂ se sesterským projektem Programu CZ08 Norských fondů 2009–2014 „Studie pilotních technologií CCS pro uhelné zdroje v ČR“. Cílem workshopu byla prezentace hlavních výsledků obou projektů a vzájemné sdílení zkušeností s partnery i odbornou veřejností a přítomnými českými a norskými veřejnými činiteli. Představeny byly také další aktuálně probíhající projekty řešící problematiku CCS za přispění Technologické agentury ČR a jiných grantových programů. Výsledky projektu REPP-CO₂ byly představeny prostřednictvím 5 přednášek a 3 posterů. Česko-norského semináře se zúčastnilo 30 účastníků převážně z Norského království a České republiky. Podrobná zpráva o realizaci workshopu je předmětem výstupu V8.14; kopie prezentací a fotogalerie jsou dostupné on-



line na adrese <http://www.geology.cz/ccs/oslo-prezentace>.

Závěrečná projektová konference byla rovněž realizována ve spolupráci se sesterským projektem „Studie pilotních technologií CCS pro uhelné zdroje v ČR“. Pod názvem „Zachytávání a ukládání CO₂ v podmínkách ČR – spolupráce České republiky a Norska“ ji pořádaly ÚJV, ČGS a ČVUT v Praze ve dnech 7.–8. 11. 2016 v prostorách pražské Masarykovy koleje. Na konferenci byly představeny hlavní výsledky a závěry obou výzkumných projektů, které ji zorganizovaly, a také další aktuální projekty řešící problematiku CCS za přispění Technologické agentury ČR a dalších programů.

Konference se zúčastnilo 73 zájemců o problematiku CCS, čímž se stala historicky největší akcí s tematikou CCS na území ČR. Program byl rozdělen na čtyři hlavní sekce: Rozvoj CCS v České republice a v Norsku, Projekt „Studie pilotních technologií CCS pro uhelné zdroje v ČR“, Výsledky projektu REPP-CO₂ a Prezentace výsledků dalších projektů v oboru CCS. V průběhu dvou konferenčních dní zaznělo celkem 29 přednášek, z toho 11 bylo věnováno výsledkům projektu REPP-CO₂. Prezentace z konference byly zpřístupněny on-line na informačním portálu pro technologie zachytávání a ukládání CO₂ <http://www.geology.cz/ccs/praha-prezentace>, kde je k dispozici i fotogalerie. Podrobná zpráva o realizaci konference je obsažena ve výstupu V8.15.

SEZNAM VÝSTUPŮ AKTIVITY 8

V8.1 Představení projektu v ČR a v Norsku
 V8.2 Prezentace projektu a dílčích výsledků na Trondheim CCS Conference
 V8.3 Prezentace dílčích výsledků projektu na Goldschmidtově konferenci
 V8.4 Přehled realizovaných publikačních aktivit na projektovém webu
 V8.5 Výtisky závěrečné zprávy
 V8.6 Projektový web online
 V8.7 Rozšíření informačního portálu o technologiích CCS o vzdělávací část (vysvětlující texty a videa)

V8.8 Tematická sekce na webu „Svět geologie“
 V8.9 Vydání tiskových zpráv
 V8.10 Článek v populárně naučném periodiku
 V8.11 Realizace přednášek pro studenty
 V8.12 Informační leták „Geologické ukládání CO₂“
 V8.13 3 čísla projektového newsletteru
 V8.14 Realizace česko-norského workshopu o spolupráci ve výzkumu CCS
 V8.15 Realizace závěrečné projektové konference včetně zveřejnění prezentací na projektovém webu

10. Výměna zkušeností a vzdělávání

Hlavním cílem této aktivity bylo zvýšit úroveň odborné kapacity českých partnerů projektu v oblasti geologického ukládání CO₂ prostřednictvím přenosu informací, znalostí a know-how od norského partnera projektu (IRIS), dalších norských subjektů a z prostředí mezinárodní vědecké komunity. Získané znalosti a informace byly nejen využity při řešení projektu, ale představují i významné posílení národního vědecko-výzkumného potenciálu do budoucna.

10.1 Výměna zkušeností v rámci mezinárodního networkingu

V rámci tohoto úkolu bylo využito stávajícího členství ČGS a IRIS v Evropské síti excelence pro geologické ukládání CO₂ – CO₂GeoNet. Při řešení projektu byly využívány informace a zdroje literatury shromážděné ve znalostní databázi networku („Knowledge repository“) na webu <http://www.cgseurope.net/>, např. shrnující studie „Monitoring methods“, která poskytla řadu vstupních informací pro přípravu monitorovacího plánu úložiště v Aktivitě 5, nebo studie „Selection and Characterisation Methods“, která byla využita zejména při zpracování plánů dalších aktivit na lokalitě LBr-1 v Aktivitě 6.

Na základě osobních kontaktů v rámci CO₂GeoNet bylo s partnery CIUDEN (Španělsko) a GFZ (Německo) dohodnuto poskytnutí informací o monitorovacích plánech pilotního úložiště CO₂, které tyto partnery spravují – Hontomínu ve Španělsku a Ketzinu v Německu. Tyto podklady (zejména pak technická schémata vystrojení a technického vybavení injektážních a monitorovacích vrtů) byly využity jako cenné vstupní informace pro přípravu monitorovacího plánu úložiště v Aktivitě 5 a pro zpracování scénářů dalšího rozvoje úložiště LBr-1 v Aktivitě 6.

Členství ČGS a IRIS v CO₂GeoNet umožnilo projektovému konsorciu REPP-CO₂ zapojit se do aktivity směřující k začlenění českého pilotního úložiště LBr-1 mezi vybrané lokality evropského výzkumného projektu ENOS (ENabling Onshore CO₂ Storage), připravovaného pro program Horizon2020, výzva „Bezpečná, čistá a účinná energie“. Hlavní práce na přípravě projektu probíhaly v rámci sítě CO₂GeoNet (za aktivní účasti ČGS a IRIS) v období únor–květen 2015; v květnu byl návrh projektu odevzdán k posouzení Evropské komisi. Návrh byl ohodnocen relativně vysokým skóre, přesto nebyl v prvním kole hodnocení vybrán k financování a byl zařazen na čekací listinu potenciálně financovatelných projektů.

Teprve v dubnu 2016 rozhodla Evropská komise o financování projektu ENOS a v následných několika měsících probíhalo intenzivní vyjednávání mezi projektovým konsorciem ENOS a EK o podmínkách přidělení grantu.

ENOS byl oficiálně zahájen 1. září 2016, což umožňuje bezprostřední pokračování aktivit realizovaných v rámci REPP-CO₂ a další posun vývoje celého pilotního projektu úložiště LBr-1 směrem k jeho plné realizaci.

Hlavní aktivity plánované pro úložiště LBr-1 v rámci projektu ENOS zahrnují:

- podrobnou analýzu zlomových struktur ložiska z hlediska možnosti jejich reaktivace a potenciálního úniku CO₂ z úložiště,
- dynamické modelování průběhu a následků případného úniku CO₂ podél starých likvidovaných vrtů, včetně souvisících geochemických jevů a kvantifikace úniku,
- detailní rozpracování a optimalizaci scénářů možné intenzifikace těžby ropy pomocí injektáže CO₂,
- studii posuzující případné přeshraniční vlivy při provozu pilotního úložiště souvisící s polohou úložné struktury v blízkosti hranice se Slovenskem,
- partnerství a výměnu informací a zkušeností s realizačním týmem projektu ukládání CO₂ na ložisku Wellington v Kansasu, USA,
- studii posuzující širší možnosti intenzifikace těžby ropy pomocí injektáže CO₂ s jeho následným uložením v oblasti Vídeňské pánve na území ČR, Slovenska a Rakouska.

V rámci aktivit projektu ENOS se do výzkumných prací na ložisku LBr-1 zapojí i další evropské partnery, což umožní využití dalších špičkových, často novátorských, metod a technologií. V závěrečném období projektu REPP-CO₂ proto probíhala intenzivní technická a organizační příprava na hladké předání dat a výsledků získaných v rámci REPP-CO₂ do projektu ENOS. Nezapomenutelnou roli v tom sehrála projektová geodatabáze REPP-CO₂, v níž jsou uložena všechna využívaná i nově vzniklá data.

Realizace projektu ENOS a skutečnost, že LBr-1 je jednou z jeho klíčových výzkumných lokalit, představuje významný příspěvek k zajištění udržitelnosti výsledků projektu REPP-CO₂, které budou v návazném projektu ENOS plně využity.

Spolupráce mezi projektem REPP-CO₂ a sítí CO₂GeoNet vytvořila předpoklady i pro zviditelnění projektu na každoročních prestižních evropských konferencích CO₂GeoNet Open Forum, zaměřených na nejnovější výsledky výzkumu, vývoje a implementace geologického ukládání CO₂. V rámci 11. ročníku této konference, který se uskutečnil v Benátkách v květnu 2016, zorganizoval REPP-CO₂ půldenní workshop s názvem „CO₂ Storage Pilot Projects in Europe“ (obr. 10-1). V úvodní sekci workshopu byl detailně představen projekt REPP-CO₂ a jeho výsledky, zatímco ve druhé sekci byly podrobně představeny další evropské pilotní projekty – Heletz v Izraeli, Hontomín ve Španělsku, Geo-Energy Test Bed



Obr. 10-1 Zahájení workshopu „CO₂ Storage Pilot Projects in Europe“ v Benátkách (květen 2016).

ve Velké Británii a Q16Maas v Nizozemí. Workshopu se zúčastnilo celkem 44 zájemců, z toho 31 účastníků bylo členy mezinárodní asociace CO2GeoNet.

Kromě toho byly projekt REPP-CO2 a jeho výsledky prezentovány i v hlavním programu konferencí Open Forum, a to formou přednášky v roce 2016 nebo posterů (2015, 2016, 2017). Aktivity REPP-CO2 na konferenci Open Forum 2016 byly financovány z Bilaterálního fondu programu CZ-08.

10.2 Vzdělávání

Vzdělávací kurzy

Norský partner IRIS připravil v průběhu projektu dva krátké (jednodenní až dvoudenní vzdělávací kurzy) pro české partnery. Zaměření kurzů bylo zvoleno tak, aby pokrylo oblasti s nejvíce chybějící úrovní znalostí ČR; kurzy byly proto zaměřeny na rizikovou analýzu a geomechaniku rezervoárů.

Obr. 10-2 Kurz rizikové analýzy ve Stavangeru.



Ve dnech 7.–8. října 2015 se v rámci projektového mítinku ve Stavangeru uskutečnil krátký vzdělávací kurz zaměřený na rizikovou analýzu (obr. 10-2). Jeho úkolem bylo seznámit partnery se základními principy rizikové analýzy v oblasti geologického ukládání CO₂, včetně využití metod a postupů používaných při průzkumu a těžbě ropy a plynu v Norsku, a vyměnit si zkušenosti s českými zástupci z ÚJV, kteří působí v oblasti posuzování rizik v oblasti jaderného průmyslu. Kurzu se zúčastnilo 9 účastníků z ČR a 3 z Norska. Předmětem kurzu byla tato témata: úvod do managementu rizik; základy analýzy spolehlivosti; analýza ochranných bariér na zamezení nahodilých a nepředvídatelných událostí, které by mohly poškodit životní prostředí; probabilistické posouzení bezpečnosti – různé aplikace v prostředí atomových elektráren; zhodnocení rizika a bezpečnosti v problematice ukládání radioaktivního odpadu a CO₂.

18. dubna 2016 se v Ostravě uskutečnil jednodenní vzdělávací kurz rezervoárové geomechaniky. Kurz připravili pracovníci VŠB jako přidruženou akci projektového mítinku; garantem odborné náplně byl norský partner IRIS. Zaměření kurzu na „začátečníky“ – výzkumné pracovníky a pokročilé studenty s geologickým vzděláním, ale bez specializace na geomechaniku“ se ukázalo jako správná volba – kurzu se zúčastnilo 15 zájemců z řad českých partnerů projektu REPP-CO2. Kurz byl rozdělen do tří částí. První část byla zaměřena na základní principy geomechaniky – rozložení a změny tlaku a napětí v horninovém prostředí. Druhá, praktická část zahrnovala návštěvu geomechanických laboratoří VŠB a partnerského Ústavu geoniky AV ČR, včetně ukázky vybraných geomechanických zkoušek v praxi. Závěrečná, třetí část byla věnována dynamickému modelování a geomechanickým dopadům dynamických změn v rezervoáru.

Studijní návštěvy

Druhým nástrojem přenosu znalostí a zkušeností využitým v projektu REPP-CO2 byly krátké studijní návštěvy českých výzkumných pracovníků na pracovištích norského partnera IRIS ve Stavangeru.

V termínu 15.–19. srpna 2016 proběhla studijní návštěva tří pracovníků VŠB na pracovištích IRIS, zaměřená na oblasti geomechaniky a studia rezervoárových parametrů hornin. Souběžně proběhla také studijní návštěva zástupce ÚJV s hlavním zaměřením na geochemické modelování. Po dohodě s norským partnerem byly tyto studijní návštěvy zkombinovány s konzultační návštěvou pracovníků VŠB k problematice fázového vytěsňování ropy z kolektorských hornin a ovlivňování kolektorských parametrů na University of Stavanger, která byla naplánována v rámci Aktivity 7. Spojení těchto tří akcí v jednom termínu umožnilo připravit vzájemně provázaný program s mezioborovým přesahem, což se ukázalo jako přínosné jak pro vzájemnou

výměnu zkušeností a sdílení znalostí, tak pro operativní řešení některých úkolů v rámci samotného projektu REPP-CO2.

Druhou krátkou studijní návštěvu v IRIS absolvovali tři pracovníci ČGS ve dnech 12.–16. září 2016. Cílem cesty bylo získání zkušeností z přípravy dynamického modelu

úložného komplexu LBr-1 a analýzy rizik, které realizovali pracovníci IRIS na základě podkladů připravených v ČGS, zejména trojrozměrného geologického modelu úložiště.

Podrobná zpráva s popisem studijních návštěv a jejich výsledků je náplní projektového výstupu V9.3.

SEZNAM VÝSTUPŮ AKTIVITY 9

V9.1 Zpráva o interakcích mezi REPP-CO2 a CO2GeoNet
V9.2 Uskutečnění 2 krátkých vzdělávacích kurzů

V9.3 Uskutečnění 3 krátkých studijních návštěv na výzkumných pracovištích v Norsku – textová zpráva s popisem výsledků

11. Koordinace a řízení projektu

Koordinace a řízení projektu byly náplní projektové Aktivity 10. Jejím hlavním cílem bylo zajištění hladkého průběhu realizace projektu. REPP-CO2 byl rozsáhlý a komplexní projekt, na jehož realizaci se podílelo více než 130 výzkumných pracovníků a techniků ze 7 organizací – šesti českých a jedné norské. Navíc musel být realizován ve velmi krátkém časovém období; původní, velmi napjatý časový plán počítal s harmonogramem 16 měsíců, který byl nakonec prodloužen na 23 měsíců. Výkonný a efektivní management projektu byl proto klíčovým faktorem úspěchu.

Struktura řízení projektu a role jednotlivých úrovní a článků řízení byly připraveny a přesně definovány již v průběhu přípravy projektu a zakotveny v konsorciální smlouvě a jednotlivých smlouvách o partnerství mezi konečným příjemcem (ČGS) a partnery projektu. Byl zvolen model řízení obvyklý u velkých výzkumných projektů řešených v rámci evropských rámcových programů.

11.1 Koordinace a řízení projektu a dílčích úkolů

Nejvyšším rozhodovacím orgánem projektu byla Valná hromada, v níž měl každý partner jednoho zástupce. Valná hromada projektu se sešla na celkem pěti jednáních konaných v rámci projektových mítinků. V průběhu projektu nemusela řešit žádné zásadní problémy, což svědčí o nadstandardní úrovni vzájemné spolupráce mezi partnery.

Vlastní operativní řízení zajišťoval koordinátor projektu s podporou administrátorky a dalších členů administrativního týmu. Při své činnosti se opíral o vedoucí jednotlivých aktivit, kteří měli na starosti koordinaci a řízení prací spadajících do příslušné aktivity a zodpovídali za jejich realizaci dle plánu. Cíle a náplň práce byly podrobně definovány v dokumentu „Detailní popis odborných částí aktivit projektu“. 10 projektových aktivit (viz obr. 1-2) v něm bylo rozpracováno do 54 úkolů, v některých případech i do dílčích úkolů (podúkolů). Pro každý úkol byly kromě náplně práce definovány i výstupy (včetně závazných termínů) a milníky. Celkem bylo naplánováno a odevzdáno 106 výstupů, vesměs ve formě textových zpráv, v některých případech doplněných datovými nebo grafickými soubory.

Vzájemnou koordinaci mezi aktivitami zajišťoval Řídicí výbor projektu, který sestával z koordinátora a vedoucích 6 klíčových aktivit. Členové výboru byli po celou dobu trvání projektu ve víceméně neustálém pracovním kontaktu, a to ve formě e-mailové, telefonické, internetové nebo osobní komunikace. Zhruba 1x za 2 měsíce se konala oficiální jednání Řídicího výboru formou internetových konferencí; v průběhu projektu se jich uskutečnilo celkem 9. Pro usnadnění komunikace byl

použit internetový komunikační systém WebEx, který umožňoval organizovat online internetové konference s možností audio- i videokomunikace, sdílení souborů a pořizování zvukového záznamu z jednání s následným přehráváním. Kromě internetových konferencí se členové výboru setkávali také osobně v rámci projektových mítinků.

Velký význam pro hladký průběh projektu měly projektové mítinky, které zajišťovaly osobní setkávání hlavních řešitelů projektu a poskytl důležitý prostor pro prodiskutování řešených aktivit a úkolů a nezastupitelnou vzájemnou interakci mezi partnery a jednotlivými řešiteli. Bylo uspořádáno celkem 5 projektových mítinků, postupně ve všech sídlech partnerských institucí – v Brně (únor 2015), Řeži (červen 2015), Stavangeru (říjen 2015), Ostravě (duben 2016) a Praze (listopad 2016). Mítinky byly vesměs 1,5–2denní, aby poskytl dostatečný prostor k diskuzím nad probíhajícími řešeními projektu. Účastnilo se jich zpravidla 20–30 hlavních řešitelů projektu.

V rámci zvýšení efektivity řízení a kvůli úspoře cestovních nákladů byly k projektovým mítinkům často přiřazeny i další aktivity, jako např. pracovní mítinky jednotlivých aktivit nebo úkolů, krátké vzdělávací kurzy (viz kap. 10), jednání Řídicího výboru, Valné hromady apod. Přidruženou akcí projektového mítinku v Ostravě v dubnu 2016 byla terénní exkurze, která zahrnovala návštěvu zájmové oblasti Vídeňské pánve se zastávkami na těžební lokalitě ropy Uhřice a sousedním podzemním zásobníkem plynu, návštěvu sídla firmy MND, a. s., v Hodoníně s krátkým seminářem a výměnou informací mezi přítomnými zástupci projektu a MND a návštěvu lokality LBr-1 s ukázkami hydrogeologického měření a atmogeochemického monitoringu (obr. 11-1).

Hlavním poradním orgánem projektu byl Poradní panel, který sestával ze zástupců hlavních cílových skupin projektu – legislativních a regulačních orgánů státní správy a průmyslových podniků potenciálně zainteresovaných v technologii CCS. Na základě pozvání ČGS se práce v Poradním panelu účastnili zástupci Ministerstva životního prostředí (Odbor Energetiky a ochrany klimatu a Odbor geologie) a těžebních společností MND, a. s., a GreenGas DPB, a. s. Členové poradního panelu byli průběžně informováni o průběhu řešení projektu a jeho výsledcích a měli k dispozici veškeré projektové výstupy. Cílem interakce s Poradním panelem bylo získat zpětnou vazbu od zástupců cílových skupin ohledně způsobu řešení projektu a praktického budoucího využití jeho výstupů.

V rámci projektu proběhla dvě jednání Poradního panelu se zástupci Řídicího výboru projektu. První se konalo 16. června 2016 v prostorách MŽP v Praze a druhé



Obr. 11-1 Česko-norská diskuze nad geologickou mapou při terénní exkurzi na lokalitě plánovaného úložiště LBr-1.

8. listopadu 2016 v Praze, bezprostředně po skončení závěrečné projektové konference. V průběhu těchto jednání zástupci Řídicího výboru seznámili členy Poradního panelu s dosavadním průběhem a výsledky projektu, poté proběhla diskuze nad vybranými tématy souvisejícími s řešením projektu. Diskutovaná témata zahrnovala např.:

- dosažené výsledky projektu z hlediska hlavních cílových skupin
- ověření metodiky pro posuzování úložiště stanovené legislativou
- získání know-how při posuzování vhodnosti lokality pro ukládání CO₂ a posuzování rizika ukládání a jeho využití
- možnosti dalšího pokračování projektu včetně vlastní realizace pilotního úložiště
- problematiku vztahu s veřejností.

Výsledkem diskuzí byla mj. řada doporučení Poradního panelu pro další realizaci projektu a návazné aktivity po jeho ukončení. Zápisy z jednání jsou náplní projektového výstupu V10.2.

11.2 Administrace projektu, součinnost s poskytovatelem grantu a reporting

Náplní tohoto úkolu byla administrativní podpora projektového managementu, a to jak při každodenním řízení a koordinaci projektu, tak i při průběžném a periodickém vykazování a přípravě monitorovacích zpráv. Patřilo sem rovněž praktické zajištění součinnosti s poskytovatelem grantu (MF) i partnerem programu (MŽP),

včetně telefonických a e-mailových konzultací, popř. osobních jednání na obou ministerstvech, jakož i předkládání dokumentů a komunikaci prostřednictvím systému CEDR.

Na podporu realizace projektového plánu vznikla řada podpůrných dokumentů, z nichž je třeba uvést zejména projektový plánovací (Ganttův) diagram určený pro operativní sledování realizace projektu, detailní tabulku projektové struktury s vyznačením pracovních kapacit všech zúčastněných pracovníků nebo průběžně aktualizované tabulky čerpání pracovních kapacit podle funkcí v projektu. Všechny tyto dokumenty byly v průběhu realizace projektu průběžně aktualizovány.

Bylo připraveno a v systému CEDR odevzdáno celkem 5 monitorovacích zpráv a žádostí o platbu a závěrečná zpráva. Dále bylo připraveno, předloženo a odsouhlaseno celkem 8 změn projektu, z toho 2 podstatné. Některé změny vyžadovaly sjednání a uzavření dodatků k partnerským smlouvám s některými partnery.

Dne 5. 10. 2016 se v sídle KP v Praze na Klárově uskutečnila kontrola projektu na místě. Kontrolu provedli zástupci poskytovatele grantu ve spolupráci s firmou AQE advisors. Zástupci projektu (koordinátor, členové administrativního podpůrného týmu a vybraní vedoucí aktivit a hlavní řešitelé) poskytli členům kontrolního týmu veškerou potřebnou součinnost. Při kontrole nebylo identifikováno žádné zjištění a všechna doporučení uvedená v protokolu byla postupně realizována.

Důležitou součástí úkolu byla organizace zadávacích a výběrových řízení na nákup investic, materiálů a služeb. V průběhu projektu byla úspěšně realizována

celkem 4 výběrová řízení na nákup přístrojů dle zákona o veřejných zakázkách a řada zadávacích řízení v režimu VZMR (veřejné zakázky malého rozsahu).

Nedílnou součástí administrace projektu bylo rovněž průběžné ekonomické řízení a monitoring čerpání nákladů projektu v celé šíři jednotlivých aktivit a úkolů, v souladu s odsouhlaseným rozpočtem. Tohoto úkolu se zhostila finanční manažerka projektu (ČGS), která spolupracovala s pověřenými kontaktními osobami z partnerských institucí. Výstupy této části řízení projektu jsou zejména jednotlivé žádosti o platbu předložené v systému CEDR a aktualizovaný ekonomický plán s přehledem čerpání rozpočtu (viz výstup V10.5).

Protože v projektovém konsorciu působil norský partner a drtivá většina reportingu a komunikace s poskytovatelem grantu probíhaly v češtině, bylo také třeba zajistit operativní překlady důležitých textů a dokumentů z češtiny do angličtiny a naopak. Bylo třeba mj. přeložit důležité projektové dokumenty jako „Detailní popis odborných částí aktivit projektu“, příspěvky norského partnera do monitorovacích zpráv, dílčí části některých projektových výstupů, na nichž se podílel norský partner apod.

11.3 IT podpora

Podpora informačních technologií byla pro řízení a celou realizaci projektu tohoto rozsahu naprosto klíčová. Vlastní podpora projektu sestává ze dvou hlavních částí – podpory komunikace a sdílení souborů mezi jednotlivými partnery projektu a správy projektových dat, která rovněž zahrnovala řadu podpůrných činností jako vektorizaci, převody souřadnicových systémů, přípravu a tisky map, schémat apod.

Komunikace

K zajištění podpory komunikace mezi partnery projektu byl zřízen „projektový intranet“ (<http://www.geology.cz/repp-co2/interni>) – neveřejná část projektového webu s přístupem jen pro partnery. Tato část byla průběžně aktualizována tak, aby pružně reagovala na veškeré změny ve struktuře projektu, personálním obsazení apod. Poskytovala uživatelům mj. hromadné e-mailové adresy jednotlivých skupin řešitelů projektu ve struktuře odpovídající členění projektových aktivit a funkci „send e-mail“ umožňující rozeslat hromadný e-mail účastníkům dané aktivity nebo, alternativně, všem účastníkům projektu (celkem 13 skupin dle jednotlivých aktivit a úkolů).

Nepostradatelným komunikačním nástrojem mezi partnery projektu bylo „projektové úložiště“ – adresářová struktura projektu, která byla přístupná k ukládání a stahování souborů všem partnerům projektu, a to jak pracovníkům ČGS (\nts46\661130_REPP-CO2), tak kolegům z partnerských institucí (<https://terminal.geology.cz>). Adresářová struktura, která je fyzicky ulo-

žena na pražském pracovišti ČGS, obsahuje informace o legislativě, pravidla norských grantů a projektovou dokumentaci (01 General Guidelines & Documents, 02 Project documents), pracovní adresáře pro jednotlivé aktivity (03 Activities, 04 Instruments & Software), složku s kontakty na členy manažerského týmu projektu, vedoucí aktivit, úkolů a podúkolů (05 Partners Contacts), články z odborné literatury využívané v projektu (06 Literature) a úložiště výstupů strukturované podle aktivit projektu (07 Vystupy-Deliverables). Dále jsou k dispozici informace o projektových mítincích i externích konferencích (08 Meetings & Conferences) a administrativní data – loga, šablony apod. (09 Administration). V adresáři 10_DATA je uložen centrální datový sklad (CDS) projektu.

Data uložená ve sdíleném prostoru byla pravidelně aktualizována a zálohována, přičemž hlavní pozornost byla zaměřena zejména na udržení přehledné struktury adresářů a aktuálnost uložených dokumentů potřebných pro řešení projektu, včetně pracovních a finálních verzí jednotlivých projektových výstupů, informací z projektových mítinců apod.

Sdílení a správa projektových dat

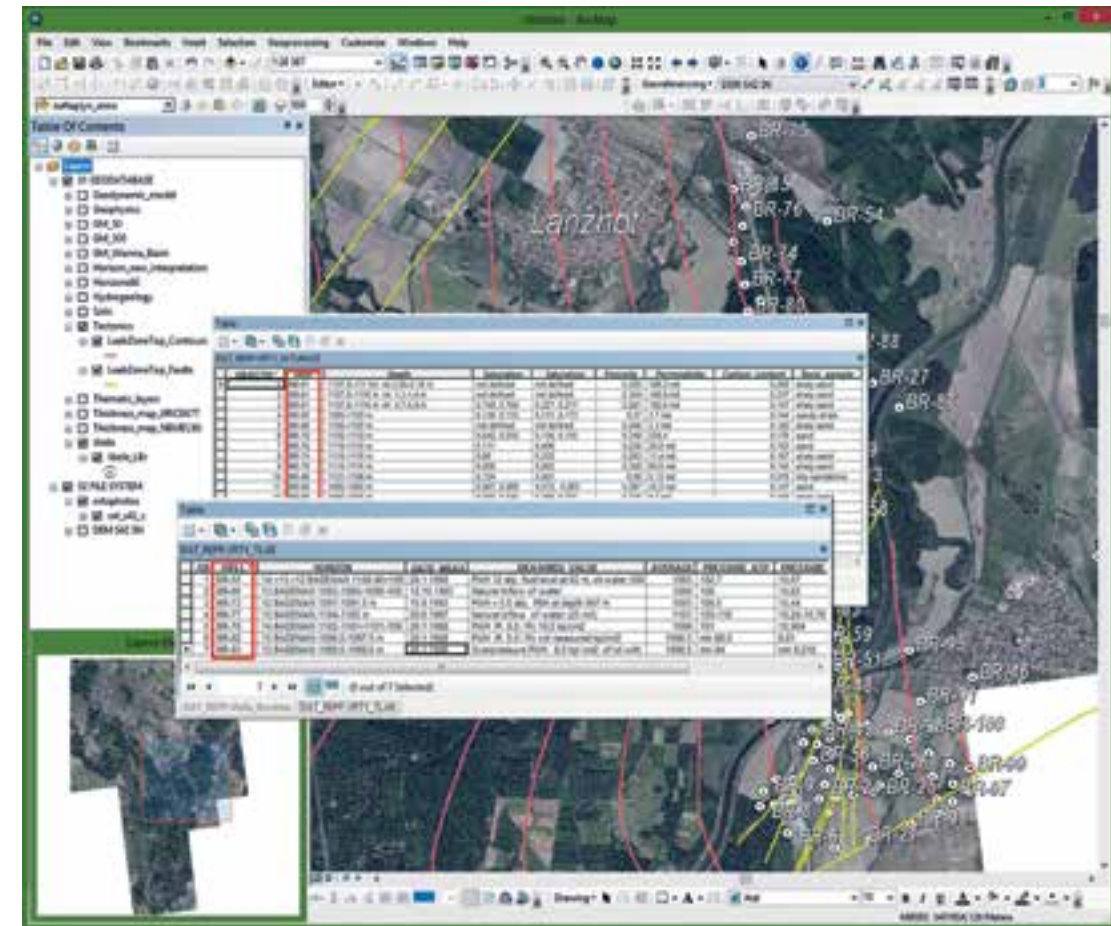
V rámci správy a sdílení projektových dat byly práce soustředěny zejména na tyto hlavní činnosti:

- příprava datového modelu
- vektorizace dat projektu
- tvorbě digitálního modelu reliéfu
- zpracování rastrových dat
- příprava topografického podkladu
- tvorba map a schémat
- údržba a zpracování atributových tabulek.

Na začátku zpracování dat byl po dohodě s partnery projektu zvolen souřadnicový systém, do kterého byla převáděna veškerá data v rámci projektu – S-42 (kód EPSG 28403, v systému Esri se jedná o Pulkovo_1942_GK_Zone_3N – tedy o 3. zónu).

Jako topografický podklad byl pro objekty ukládané v CDS využíván standardní topografický podklad Základních map 1 : 10 000 (ZABAGED a popisná složka Geonames), data jsou převedena do souřadnicového systému S-42.

V rámci projektu byly zpracovány a definovány přesné postupy, jakými byla data předávána a dále zpracovávána, aby se dostala do výsledných datových sad a byla přístupná všem členům projektového týmu. Autoři datových souborů byli povinni umístit získaná nebo nově pořízená data do striktně definovaného adresáře (\nts46\661130_REPP-CO2\07 Výstupy-Deliverables\Data_for_GDB), kde byla data přebírána pracovníky IT. Poté byla data zkontrolována, v případě potřeby upravena (např. zvektorizována v případě rastrových dat), převedena do správného souřadnicového systému a uložena do databázové struktury, včetně zajištění případného provázání s daty již obsaženými.



Obr. 11-2 Příklad využití dat z geodatabáze (vrty, tektonika) a file systému (ortofotka) při zobrazení části zkoumané oblasti v SW ArcMap. Na obrázku jsou i tabulky, které zobrazují data k jednotlivým vrtům (vlastnosti odebraných vzorků, tlak).

Základním nástrojem správy a sdílení projektových dat je centrální datový sklad (CDS) v adresáři \nts46\661130_REPP-CO2\10 Data. Skládá se jednak z geodatabáze REPPCO2.gdb uložené v podadresáři 01 GEODATABASE, jednak z adresářové struktury uložené v podadresáři 02 FILE SYSTEM.

Geodatabáze je prostorová databáze pro ukládání, dotazování a manipulaci s geografickými informacemi a prostorovými daty. Byla vytvořena pro centrální správu a zpracování veškerých digitálních prostorových dat v rámci projektu. Pro její zřízení a provozování je využívána technologie Esri, na které je postaven podnikový GIS České geologické služby. Geodatabáze byla vyvinuta v relační databázi Oracle, včetně kódovníků, které jsou potřeba pro vyplňování atributů. V průběhu řešení projektu se struktura geodatabáze neustále vyvíjela, tak jak přibývala nová data. Struktura byla proto podle potřeby zhruba 1x za měsíc průběžně aktualizována a dokumentována pomocí SW ArcGIS Diagrammer.

Geodatabáze REPP-CO2 obsahuje prostorové třídy prvků (Feature classes), které jsou tematicky sdružovány do datasetů (Datasets) a neprostorové tabulky (Tables), které jsou relačně navázány (Relationships) na prostorové tabulky. Geodatabáze obsahuje celkem 229 prostorových tříd prvků v 13 datasetech. Dále je

zde uloženo 47 neprostorových tabulek, 21 relačních tříd a 9 číselníků. Kromě toho je v geodatabázi dalších 34 souborů prostorových orientovaných (rektifikovaných) rastrových datasetů.

Do adresářové struktury v podadresáři 02 FILE SYSTEM, která tvoří druhou část CDS, byla ukládána většinou neprostorová data. Jedná se např. o archivní karotážní data (adresář „LBr_LogsL“), soubory map uložených ve formátu PDF (adresář „PDF“) nebo styly pro vykreslování linií, značek a geologických těles v geologických mapách v geografickém informačním systému (adresář „style“). Dále jsou zde umístěna ortofota zájmového území (adresář „ortofoto“).

Geodatabáze, a de facto celý vytvořený CDS, představují jeden z hlavních prvků zajišťujících udržitelnost výsledků projektu. Jsou v něm soustředěna veškerá data, která byla při řešení projektu REPP-CO2 použita, ať už jde o archivní data získaná rozsáhlou rešerší existujících zpráv, datových zdrojů a informací v Aktivitě 1, nebo o data nově získaná či zpracovaná v rámci projektu. Jejich přehledné a strukturované uložení je zárukou využitelnosti dat při jakýchkoli dalších návazných pracích na lokalitě LBr-1. Struktura a obsah geodatabáze jsou podrobně popsány v projektovém výstupu pV10.9 „Projektová geodatabáze – finální verze“.

SEZNAM VÝSTUPŮ AKTIVITY 10

V10.1 Zápisy z 5 projektových mítinků	V10.6 Překlady příspěvků do zpráv, kapitol výstupů projektu a dalších textů mezi angličtinou a češtinou
V10.2 Zápisy z jednání Řídicího výboru, Valné hromady a Poradního panelu	V10.7 Projektový „intranet“ – první funkční verze
V10.3 Průběžné zprávy o řešení projektu	V10.8 Projektová geodatabáze připravená k použití (3/2015)
V10.4 Závěrečná zpráva	V10.9 Projektová geodatabáze – finální verze
V10.5 Aktualizovaný ekonomický plán projektu s přehledem čerpání rozpočtu	