

VÝZKUM PUKLINOVÉ KONEKTIVITY V PVP BUKOV

Závěrečná zpráva

Autoři: Milan Zuna a kolektiv

Společnost „Konektivita puklin v PVP Bukov“

Praha, 2024

NÁZEV ZPRÁVY: Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov – Závěrečná zpráva

NÁZEV PROJEKTU: Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU: Závěrečná zpráva

ČÍSLO SMLOUVY: SO 2019 – 031

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Milan Zuna¹, Libor Gvoždík⁴, Martin Milický⁴, Karel Sosna³, Ondřej Švagera², Filip Jankovský¹, Jaroslav Řihošek², Petr Kabele⁵

ÚJV Řež, a. s.¹, Česká geologická služba ², SG Geotechnika a.s.³, PROGEO, s.r.o.⁴, ČVUT Praha⁵,

BIBLIOGRAFICKÝ ZÁPIS: ZUNA M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., SOSNA K., ŠVAGERA O., JANKOVSKÝ F., ŘIHOŠEK J., KABELE P. (2024): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov – Závěrečná zpráva. TZ SÚRAO 747/2024.

Společnost „Konektivita puklin v PVP Bukov“

Jan Smutek

SÚRAO

Milan Zuna

Hlavní řešitel projektu (společnost
Konektivita puklin v PVP Bukov)

Obsah

Abstrakt	2
Abstract	3
1 Úvod	4
1.1 Náplň projektu	4
1.2 Realizace projektu	5
2 Geologická charakterizace	8
3 Návrh a realizace vrtů	11
4 Charakterizace vrtů	13
4.1 Geologická charakterizace vrtných jader	13
4.2 Reorientace a korelace vrtného jádra dle dat z akustického televizoru	15
4.3 Karotáž vrtů	16
4.4 Závěry z charakterizačních metod	17
5 Multipakrový a měřicí systém – monitoring	19
6 Model zájmového bloku horniny	23
6.1 Koncepční model zájmového bloku horniny	23
6.1.1 Geologický model	23
6.1.2 Hydrogeologický model	27
6.2 Základní numerický model	31
6.2.1 Identifikace parametrů a generování stochastického sGeoDFN modelu (verze k01)	31
6.2.2 Strukturně-geologický model – identifikace průběžných struktur na základě dat z vrtů a stěn chodeb	33
6.2.3 Semi-deterministický dGeoDFN model	36
6.2.4 HydroDFN model	39
6.2.5 HydroECPM model	50
6.3 Optimalizace numerického modelu	53
7 Speciální analýzy vrtného jádra – laboratorní testy	61
7.1 Geologická a petrografická analýza	61
7.2 Studium puklinových výplní	61
7.2.1 Interpretace výsledků	61
7.3 Transportní experimenty	62
7.4 Geotechnické zkoušky	63
8 Hydraulické testy	65

8.1	Hydraulické zkoušky ve vrtech – vodní tlakové zkoušky	65
8.1.1	Vyhodnocení VTZ	66
8.2	Hydraulické testy mezi vrty	69
8.2.1	Tlakové změny - průtoky	69
8.2.2	Realizace hydraulických pulsních testů	70
8.2.3	Injektážní dipólové testy	71
9	Realizace a vyhodnocení stopovacích testů	73
9.1	Laboratorní zkoušky – přípravy testů	73
9.2	Stopovací testy in situ	73
9.3	Vyhodnocení stopovacích zkoušek	76
9.3.1	Hodnocení zkoušky 1 a 2	76
9.3.2	Hodnocení testu 3	78
10	Finalizace numerického modelu	81
10.1	Simulace stopovací zkoušky 2	83
10.1.1	Sestavení hydraulického modelu	83
10.1.2	Varianty plošného zadání parametrů	84
10.1.3	Simulace proudění a kalibrace modelu	86
10.1.4	Simulace transportu a kalibrace modelu	87
10.2	Simulace stopovací zkoušky 3	91
10.2.1	Kalibrace modelu	94
10.3	Shrnutí výsledků	95
11	Závěr	98
11.1	Shrnutí zkušeností a doporučení	98
11.2	Doporučení dalších prací	104
11.2.1	Možné využití stanoviště v ZK-2	104
11.2.2	Doporučení pro další in-situ experimenty	105
12	Citace a seznam literatury	107

Seznam použitých zkratk:

ABI	Akustický televizor (Acoustic Borehole Imaging)
CVŘ	Centrum výzkumu Řež
CEC	Kationtová výměnná kapacita (cation exchange capacity)
ČGS	Česká geologická služba
DFN	Discrete Fracture Network
DP	Dílčí plnění
EC	Elektrická vodivost roztoku (Electric Conductivity)
ECPM	ekvivalentní porézní kontinuum (Equivalent Continuum Porous Media)
Eh	Oxidačně - redukční potenciál (vztažený k vodíkové elektrodě)
EIZ	Zóna vlivu ražby (Excavation Influence Zone)
EURAD (FUTURE)	Evropský program Fundamental understanding of radionuclide retention
Fsc	sodná sůl fluoresceinu / uranin
GeoPET	Pozitronová emisní tomografie (uzpůsobená pro horninové vzorky)
GHB	okrajová podmínka obecné (vzdálené) hladiny (general head boundary)
GRYF	Společnost GRYF HB, spol. s r.o.
HPLC	Vysokoúčinná kapalinová chromatografie
HTO	Tritiovaná voda (Tritiated water)
HÚ	Hlubinné úložiště
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
ISE	Iontově selektivní elektroda
IUGS	International Union of Geological Sciences
LDO	Koncentrace rozpuštěného kyslíku (Liquid dissolves oxygen)
μ CT	Rentgenová výpočetní mikrotomografie (computerized tomography)
MOVE	Modelovací software MOVE (PE Limited, Petex)
OBI	Optický scanner/rozvinutý televizní obraz (Optical Borehole Imaging)
ORP	Oxidačně-redukční potenciál (bez korekce)
PVP Bukov	Podzemní výzkumné pracoviště Bukov
RAO	Radioaktivní odpad
RWT	Rhodamin WT
SG	Strukturně-geologický
SGW2	Syntetická granitická voda (typ 2)
SPECT	Emisní výpočetní gama tomografie (Single-photon emission computed tomography)
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
TAČR	Technologická agentura ČR
TZ	Technická zpráva
ÚJV	ÚJV Řež a. s.
URF	Underground Research Facility
VTZ	Vodní tlaková zkouška
WTW	WTW (Německo)
ZK2	Zkušební komora ZK2 (PVP Bukov)
ZZ	Závěrečná zpráva
18F	Fluor-18
3D	Troj-rozměrný

Abstrakt

Tato závěrečná zpráva shrnuje průběh prací a výsledků provedených v rámci projektu „Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov“ realizovaného Společností Konektivita puklin v PVP Bukov v letech 2019–2024.

Cílem projektu bylo získání dat pro vývoj hydrogeologických a transportních modelů pro simulace proudění podzemní vody horninového masívu v hloubce kolem 550 m. V obecné rovině pak aplikovat a ověřit komplexní pracovní postup od realizace vrtů, jejich charakterizace, instrumentace, testování hydraulických a transportních parametrů. Práce současně zahrnovaly laboratorní program, zaměřený na popis reprezentativních horninových typů, geochemii puklinových výplní a geomechanické parametry. Další část laboratorních zkoušek byla zaměřena na studium transportních parametrů vybraných stopovačů (difuze, sorpce) a transportní experimenty na vzorcích vrtných jader s přirozenou puklinou.

Pro studium puklinové sítě byl vybrán horninový blok sousedící se zkušební komorou ZK-2 v PVP Bukov. Nejprve byla provedena podrobná charakterizace horninového bloku, která zahrnovala detailní strukturní měření, fotodokumentaci, zpracování struktur v SW MOVE a následnou tvorbu 3D strukturně geologického modelu. Na základě charakterizace horninového bloku byly realizovány tři testovací vrty S-27, S-31 a S-36. Vrty byly podrobně charakterizovány pomocí souboru karotážních metod, geologického popisu vrtných jader a studia horninových vzorků. Pro monitorování byl využit i stávající vrt S-8.

Hydrogeologické poměry byly studovány především pomocí vodních tlakových zkoušek a hydraulických testů. Na základě kompletní charakterizace a výsledného 3D geometrického modelu, byly vybrány hlavní potenciálně vodivé struktury a vymezeny hlavní studované intervaly. Do každého vrtu byly následně instalovány multipakrové systémy obsahující čtyři měřicí intervaly, ve kterých byl realizován kontinuální monitoring vodních tlakových poměrů. V další etapě projektu byly mezi jednotlivými vrty uskutečněny hydraulické testy zahrnující krátkodobé vtlačecí zkoušky, pulzní zkoušky a dlouhodobé injektážní zkoušky s konstantním tlakem nebo průtokem. Po vyhodnocení testů byla provedena aktualizace modelů, simulace proudění, následně navrženy a realizovány stopovací zkoušky s konzervativními stopovači. Pozornost byla zaměřena jak na intervaly s vodivou poruchovou zónou, tak méně vodivou poruchu, s transportními vzdálenostmi kolem 13,5 m a 28 m.

V rámci řešení projektu byl sestaven geologický (GeoDFN), hydrogeologický (HydroDFN) a transportní model zkoumaného bloku horniny, který byl postupně aktualizován a zpřesňován na základě dostupných dat z charakterizačních prací a realizovaných hydraulických a stopovacích testů.

Součástí zprávy jsou i shrnuté zkušenosti a doporučení pro další činnosti, případně podobné budoucí projekty.

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, PVP Bukov, puklinové systémy, transport, modelování, GeoDFN model, HydroDFN model, hydraulické zkoušky, multipakrové systémy, tlakové poměry

Abstract

This final report summarizes the progress of the works and results carried out within the project "Research of fracture connectivity in Bukov URF" realized by the Company "Fracture connectivity in PVP Bukov" in 2019-2024.

The main aim of the project was to obtain data for the development of hydrogeological and transport models to simulate groundwater flow the rock mass at a depth of about 550 m. In general terms, then apply and validate a comprehensive workflow from the implementation of the boreholes, their characterization, instrumentation, testing of hydraulic and transport parameters. At the same time, the work included a laboratory program focusing on the description of representative rock types, geochemistry of fracture fillings and geomechanical parameters. Another part of the laboratory tests was focused on the study of transport parameters of selected tracers (diffusion, sorption) and transport experiments on natural fracture drill core samples.

The selected rock block for the study of the fracture network is adjacent to the test chamber ZK-2 situated in the Bukov URF. Firstly, a detailed characterization of the rock block was carried out, which included detailed structural measurements, photo-documentation, processing of structures in MOVE software and subsequent development of a 3D structural geological model. Based on the characterisation of the rock block, three monitoring boreholes S-27, S-31 and S-36 were drilled. The boreholes were characterised in detail using a suite of logging methods, geological description of the drill cores and study of rock samples.

Hydrogeological parameters were studied primarily by means of water pressure tests and hydraulic tests. Based on the complete characterization and the resulting 3D geometric model, the main potentially conductive structures were selected and the main study intervals were defined. Multipacker systems containing four measurement intervals were subsequently installed in each borehole, where continuous monitoring of water pressure conditions was implemented. In the next phase of the project, hydraulic tests were performed between the boreholes by both pulse tests and long-term injection tests. After the evaluation of the tests, the models were updated, flow simulations were performed, and then tracer tests with conservative tracers were designed and implemented. Attention was focused on intervals with both a high conductive fractured zone and a less conductive fractured zone, with transport distances around 13.8 m and 28 m respectively.

As part of the project, a geological (GeoDFN), hydrogeological (HydroDFN) and transport model of the studied block of rock was constructed, which was gradually updated and refined based on the available data from the characterization work and the hydraulic and tracer tests.

The report includes a summary of the experience and recommendations for further activities or similar future projects.

Keywords

Deep geological repository, Bukov URF, tracer test, fracture, migration, transport, laboratory experiments, modeling, GeoDFN model, HydroDFN model

1 Úvod

Tato zpráva shrnuje postup prací a výsledků, které byly realizovány v šesti dílčích plněních a v jednotlivých etapách projektu (Etapy 1 až 27) (Tab. 1). Plán prací a návaznost prací v rámci vybraného bloku PVP Bukov byl podrobně popsán v průběžné zprávě č. 1 formou realizačního projektu (Zuna et al. 2020). Následně byly činnosti a průběžné výsledky popsány v průběžných zprávách projektu a zprávě závěrečné (Tab. 1).

Tab. 1 Přehled dílčích plnění a technických zpráv

Dílčí plnění	Etapy	Číslo TZ	Citace
1	1–3	459/2020	Zuna et al. 2020
2	4–9	521/2020	Zuna et al. 2020b
3	10–20	551/2021	Zuna et al. 2021
4	21–23	630/2022	Zuna et al. 2022
5	24–26	702/2023	Zuna et al. 2023
6	26–28	747/2024	Zuna et al. 2024

1.1 Náplň projektu

Předmětem plnění projektu byly výzkumně-vývojové práce vedoucí k získání informací o rychlosti a charakteru toku podzemní vody, konektivě puklinových sítí a v obecné rovině pak o metodice a konzervativnosti použitých matematických modelů.

Hlavní potřebou bylo otestování následujícího komplexního pracovního postupu:

- 1) Vytvoření konceptuálního hydrogeologického modelu a předběžného matematického modelu proudění zájmového bloku horniny
- 2) In-situ testy ve vrtech v zájmovém bloku horniny
- 3) Kalibrace a verifikace modelů

V současné době je nezbytné získat reálná data z odpovídajícího prostředí HÚ, aby bylo možné ověřit, že expertní odhady vlastností hornin, na kterých jsou založeny současné hydrogeologické a transportní modely, odpovídají realitě. Důležité je testovat prostředí odpovídající horninovému masivu v místě ukládacích míst v HÚ (bez výrazných hydraulicky vodivých poruchových zón) a naopak diskrétní zlomové struktury.

Předmětem prací bylo zajištění geologické charakterizace zájmového horninového bloku, vlastní technické práce a instrumentace, vyhodnocení experimentálních prací pomocí matematického modelu.

Výzkumná činnost dle předchozího odstavce zahrnovala zejména:

- Rešerše dosavadních znalostí obdobných projektů v ČR a v zahraničí
- Geologická charakterizace zájmového horninového bloku a vrtů

- Zpracování realizačního projektu a plánu kvality projektu
- Provedení technických prací (např. vrtné práce, charakterizace vrtů)
- Instrumentace experimentu (monitoring tlakových poměrů)
- Série in-situ zkoušek a měření (vodní tlakové zkoušky, hydraulické testy, stopovací zkoušky)
- Matematický model
- Závěrečné vyhodnocení

1.2 Realizace projektu

V první fázi byla pozornost zaměřena na studium obdobných projektů ve světových laboratořích i na území ČR. Pro rešerši byly vybrány relevantní projekty v krystalinických horninách, a to především z Grimsel Test Site a Äspo Hard Rock Laboratory. Součástí rešerše byl i laboratorní program se zaměřením na studium transportních parametrů, instrumentaci experimentů, parametry testů a početních a modelových přístupů k hodnocení stopovacích zkoušek. Rešerše je součástí průběžné zprávy č. 1 - část 1 (Zuna et al. 2020).

Následně byly zahájeny práce na detailní charakterizaci vybraného horninového bloku v PVP Bukov (oblast mezi chodbami ZK-2, BZ1-XII a BZ-XIIJ) a přilehlého okolí. První část prací byla zaměřena na shrnutí dosavadních dat a výsledků z PVP Bukov získaných v průběhu let v rámci souvisejících projektů. Byly popsány jednotlivé metody využití v rámci geologického a geotechnického průzkumu oblasti s důrazem na získaná data, včetně jejich popisu v rámci geologické a strukturní charakterizace PVP Bukov, a byly shrnuty hlavní výsledky. Podrobná charakteristika zájmového horninového bloku zahrnovala detailní strukturní měření geologickým kompasem in-situ, pořízení fotografického materiálu jednotlivých stěn ve vysokém rozlišení, zpracování měřených struktur v softwaru MOVE a následnou tvorbu 3D strukturně-geologického modelu. Tento model byl využit k predikci průběhu křehkých struktur a plošně paralelních staveb a umožňoval kvalifikovaný odhad pro pozici navrhovaných vrtných prací. Práce zaměřené na charakterizaci masivu a horninového bloku jsou součástí průběžné zprávy č. 1 – část 2 (Kryl et al. 2020). Jedním z cílů charakterizace experimentálního bloku bylo na základě SG měření foliací a významných křehkých struktur navrhnout místa pro umístění prvního charakterizačního vrtu. Na základě geologické charakterizace byl nejprve odvrtán vrt S-27 o délce 58,1 m.

Po jeho odvrtání bylo provedeno důkladné vyčištění vrtu, charakterizace vrtu pomocí souboru karotážních metod, podrobná geologická charakterizace vrtného jádra a horninových vzorků. Provedená karotážní měření byla zaměřena na získání informací o litologii, porušení horniny, geomechanických vlastnostech zastižených hornin a charakteru poruch v horninovém masivu. Karotážní měření zahrnovala soubor měřících metod (vrtná kamera, optická televize OBI, akustický televizor ABI, gama karotáž, neutron-neutron karotáž, hustotní karotáž, karotáž magnetické susceptibility, elektrokarotáž, indukční karotáž, kavernometrie, inklinometrie, termometrie, rezistivimetrie a vlnová akustická karotáž). Hydrogeologické poměry ve vrtu byly zjišťovány metodou ředění označené kapaliny. Vrt byl dále charakterizován pomocí vodních tlakových zkoušek (VTZ) s využitím zkonstruovaného mobilního systému. VTZ byly provedeny na vybraných zkušebních intervalech vrtu. Na základě výsledků všech charakterizačních metod a výsledného 3D geometrickém modelu byly vybrány vhodné intervaly vrtu pro zatěsnění a následné měření/testy. V následující etapě byl zkonstruován multipakový systém obsahující čtyři těsnicí části (pakry) a tedy 4 měřicí intervaly (3 mezi pakry a 1 mezi posledním pakrem a dnem

vrty). Do všech měřicích intervalů byly instalovány piezometry pro online monitoring tlaků vody (Geokon model 4500C).

V následující etapě byly realizovány další dva vrty (S-31 a S-36), které byly zcharakterizovány stejným postupem jako vrt S-27 (karotážní měření, vodní tlakové zkoušky aj.). Ve vrtu S-31 byla v hloubce 9–12 m zastižena poruchová zóna, která představovala významné riziko pro instalaci multipakrového systému. Proto bylo rozhodnuto o její stabilizaci (zainjektování) pomocí epoxidové pryskyřice a následného převrtání injektované části vrtu. Stabilizace byla úspěšně provedena a vrt mohl být dále proměřen pomocí VTZ.

Následně byly ve vrtech provedeny intervalové VTZ. V nově realizovaných vrtech (S-31, S-36) byly testovány vybrané intervaly souborem zkoušek (pulzní test, injektážní tlaková zkouška, poklesová zkouška). Cílem hydraulických testů ve vrtech S-31 a S-36 byla charakterizace a kvantifikace hydraulických vlastností ve zvolených úsecích vrtu. Znalost těchto parametrů je nezbytným vstupem pro matematické hydraulické modely proudění a transportu látek v horninovém prostředí. Získané parametry byly současně použity k vyhodnocení hydraulických vodivostí.

Po zhodnocení všech výsledků testů byly do vybraných hloubek zapuštěny multipakrové systémy. Konstrukce multipakru umožňuje v testované etáži současně měřit tlak podzemní vody a vzorkovat, popř. injektovat, vodu ze dvou různých míst intervalu. Z důvodů zjištění hydraulického propojení studovaných vrtů (S-27, S-31, S-36) se stávajícím vrtem S-8 byl i tento vrt dodatečně charakterizován a vystrojen multipakrovým systémem s dvěma monitorovacími intervaly. Po vystrojení všech vrtů byly realizovány testy hydraulické konektivity mezi jednotlivými intervaly vrtů.

Po orientaci vrtných jader byla provedena jejich strukturně-geologická a petrologická analýza. Na vrtném jádru byly popsány jednotlivé planární strukturní prvky (pukliny, střížné pukliny, podélné pukliny, puklinové zóny, tektonické poruchy a reaktivované foliace). Strukturní a litologická data jsou přehledně shrnuta ve vrtné kolonce zpracované v softwaru LogPlot7. Na vybraných zájmových částech vrtných jader byly provedeny laboratorní analýzy reprezentativních horninových typů za účelem určení petrologie, mineralogie a geomechanických parametrů horninové matrice, výplní studovaných puklinových zón apod.

Další část prací byla zaměřena na vytvoření koncepčního modelu zájmového bloku horniny. Prostorová orientace tří vrtů (S-27, S-31 a S-36) byla navržena tak, aby poskytla informace o 3D uspořádání všech důležitých struktur v zájmovém bloku a současně poskytla relevantní informace při hydraulických a následných stopovacích zkouškách. Podrobné výsledky prací, které byly realizovány v průběhu dílčího plnění č. 3 (Etapy 10 až 20), jsou shrnuty ve zprávě Zuna et al. 2021.

Po instalaci všech multipakrů do vrtů S-27, S-31, S-36 a S-8 (Etapa 22) následovala fáze monitoringu tlakových poměrů ve všech zkušebních intervalech. V první fázi bylo sledováno ustalování tlakových poměrů ve vrtech při uzavření všech intervalů. Dále byly také měřeny průtoky z vybraných otevřených intervalů a způsobené tlakové odezvy v ostatních intervalech multipakrů. Další etapa byla zaměřena na hydraulické testy mezi jednotlivými vrty. Ve vybraných etážích vrtů byly provedeny tlakové testy, pulsní zkoušky a poté dlouhodobější hydraulické injektážní zkoušky. Ustálené poměry na konci realizovaných testů byly využity pro vyhodnocení hydraulických vodivostí testovaných úseků.

Laboratorní zkoušky v etapě 25 byly zaměřeny na studium sorpčních vlastností vybraných stopovačů na horninový materiál (hornina, puklinové výplně) a difúzní experimenty na horninové matici. Současně probíhaly laboratorní transportní experimenty na vzorcích vrtných jader s puklinami. Vizualizace transportu byla provedena pomocí μ CT analýzy a následné měření bylo realizováno na GeoPET tomografii (18F). Pro in-situ experimenty bylo laboratorně ověřeno využití solí (KCl a KI), včetně současného měření konduktivity (EC) a koncentrace jodidu pomocí ISE. Další práce byly zaměřeny na odběr a analýzu vzorků puklinových a žilných výplní získaných z vrtů S-27, S-31 a S-36 (Zuna et al. 2023). Pozornost byla dále věnována rozdílům hydrochemických parametrů v jednotlivých studovaných intervalech, především hodnotám EC a pH, které mají vliv na chování stopovače a současně bilanci stopovače v případě využití solí (měření vodivosti). Při měření byly sledovány průtoky z jednotlivých intervalů a v průtočné cele byly měřeny hydrochemické parametry (EC, pH, Eh, LDO).

Na základě vyhodnocení hydraulických testů a prediktivních modelů byly provedeny stopovací zkoušky zaměřené především na aktivní zóny s hydraulickou komunikací ve vybraných intervalech. Pro stopovací zkoušky byla vyvinuta, otestována a využita instrumentace jak pro samotnou realizaci stopovacího testu, tak pro jeho monitoring v průběhu a po ukončení stopovací zkoušky. V rámci laboratorních testů a stopovacích zkoušek byly testovány detekční systémy pro měření průtoku, koncentrací jodidu, barviv (např. fluoresceinu) a konduktivity. V průběhu etapy 26 byly provedeny a vyhodnoceny tři in-situ stopovací zkoušky za použití konzervativních stopovačů KCl, KI a fluoresceinu o koncentracích 0,01 M KCl až 0,1 M KI. Testovány byly jak intervaly vodivé (S31_2 do S36_3), tak intervaly s méně vodivou poruchou (S31_1 do S36_3ab). Vzdálenost mezi průsečíky puklin s vrty je zhruba 28 m, tj. dvakrát delší než vzdálenost průsečíků v testu (S31_2 do S36_3) (Zuna et al. 2023).

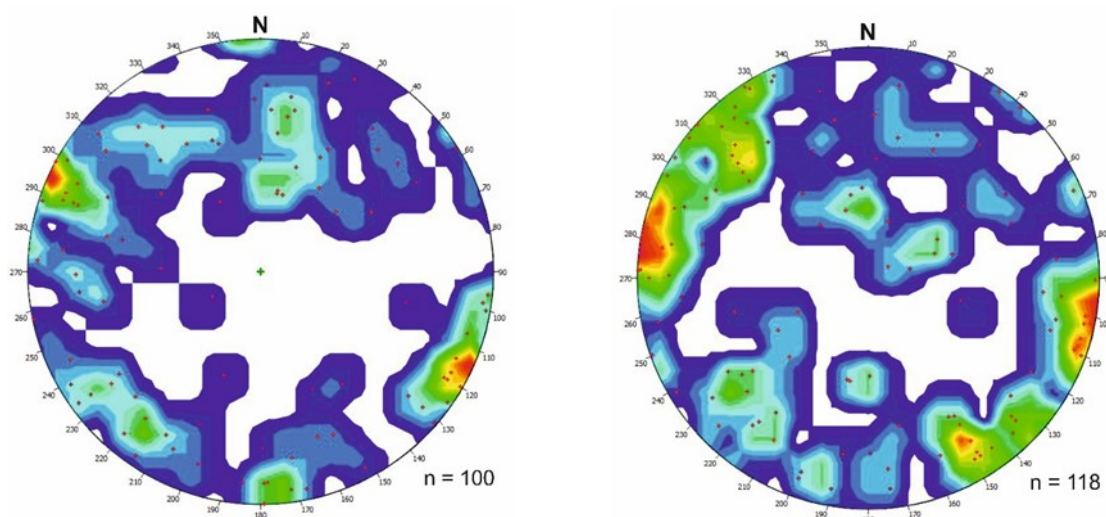
V závěrečné fázi projektu byla provedena finalizace numerického modelu (E27), která navázala na modelovací práce realizované v předchozích etapách 12, 21 a 24. Tyto etapy byly zaměřené na přípravu geometrie puklinové sítě a simulaci proudění. Cílem prací v etapě 27 bylo dopracování numerického modelu, ověření a aktualizace hydraulických parametrů a stanovení transportních parametrů konkrétních semi-deterministických puklin dle provedených stopovacích testů.

Na závěr byly shrnuty poznatky a zkušenosti a zformulována doporučení pro další činnosti. Současně byl doplněn souhrn doporučení pro případné využití stávající zkušební komory (ZK-2) včetně instrumentace a návrhy pro další potencionální experimenty.

2 Geologická charakterizace

V rámci přípravy experimentů a vrtných prací v PVP Bukov byla provedena podrobná strukturně-geologická charakteristika horninového bloku. Cílem bylo získat detailní informace o geologické stavbě bloku a navrhnout optimální pozici pro první charakterizační vrt. Detailní informace jsou součástí technické zprávy č.1 - část 2 (Zuna et al. 2020). Celkově bylo z datasetu 430 měření křehkých struktur do charakterizačního 3D SG modelu vyneseno 118 významnějších puklin neprůběžných, 100 puklin průběžných a 2 zlomy. Výplň jednotlivých křehkých struktur byla nejčastěji definovaná kalcitem, chloritem s lokálně vysráženým limonitem a u střížných poruch a zlomů případně jílem.

Petrografická charakterizace hornin v chodbách ZK-2, BZ1-XII a BZ-XIIJ rozlišila 3 hlavní litologické typy: biotitická pararula, amfibol-biotitická pararula a migmatit. Foliální stavba je ve všech chodbách plošně paralelní, s proměnlivým úklonem. Puklinový systém je tvořen průběžnými a neprůběžnými puklinami s dvěma hlavními směry: SSV-JJZ a ZSZ-VJV (Obr. 1) a byly zmapovány 3 významné zlomové struktury.



Obr. 1 Pólové diagramy znázorňující generální směr sklonu a sklon průběžných (vlevo) a neprůběžných (vpravo) puklin v jednotlivých chodbách studovaného úseku. Kontury v diagramu byly vypočteny v programu MOVE a znázorňují póly ploch jednotlivých měření in-situ v podzemí PVP Bukov

Další fáze prací zahrnovala detailní fotodokumentaci všech chodeb ve vysokém rozlišení s cílem vytvořit 3D fotogrammetrické modely pro vizualizaci a analýzu strukturních dat.

Proces tvorby modelů zahrnoval několik kroků:

1. Fotodokumentace:

Bylo pořízeno přes 1000 snímků chodeb ve vysokém rozlišení.

2. Zpracování:

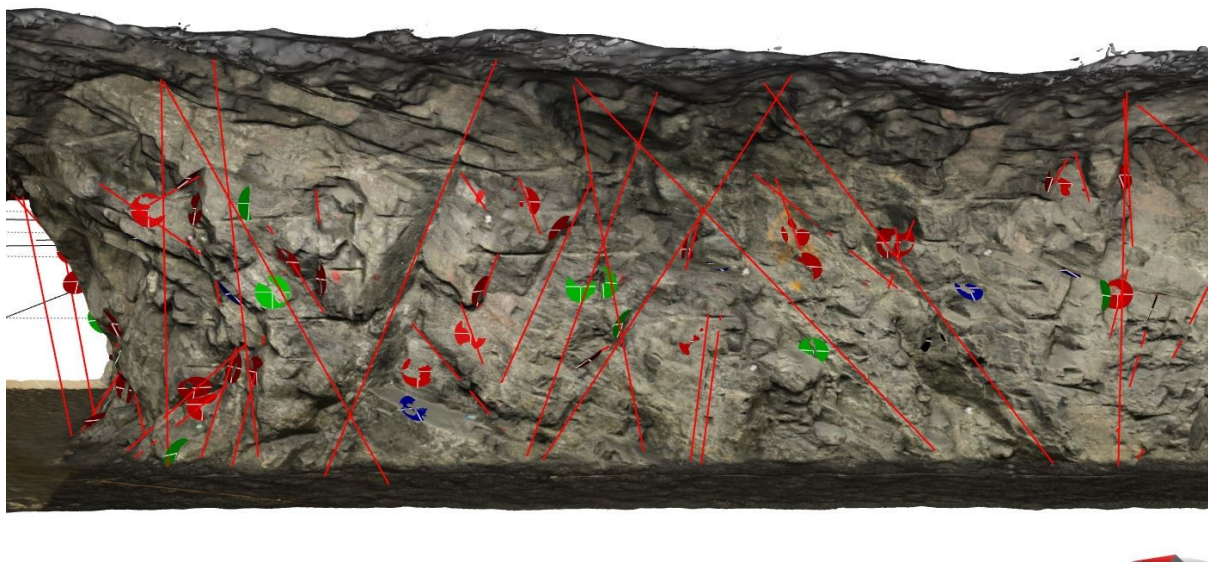
Snímky byly rozděleny do zpracovatelných úseků (jednotlivé chodby) a v programu Agisoft Metashape zpracovány do formy bodového mračna a následně 3D mesh modelu s realistickou fototexturou (Obr. 2).

3. Usazení:

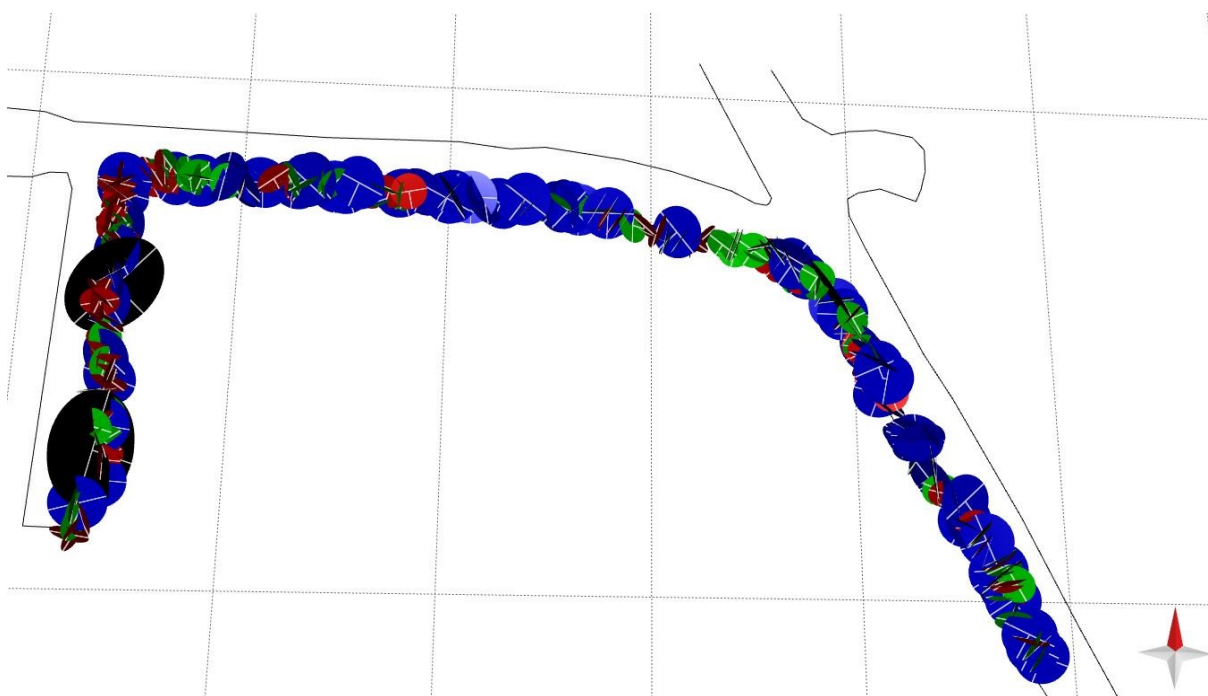
Modely byly usazeny do georeferenčního systému S-JTSK Křovák East-North (EPSG: 5514) a na půdorysu PVP Bukov získaném od DIAMO s.p.

4. Vynášení dat:

Na základě databáze měření všech strukturních dat zdokumentovaných v podzemí byla do modelů vynesena vybraná reprezentativní data pro GeoDFN model (Obr. 3). Detailní popis měřených dat je k dispozici v TZ 459/2020 (část 2 - Kryl et al. 2020).



Obr. 2 Příklad části fotogrammetrického modelu zpracovaného v MOVE s vyznačenými orientacemi jednotlivých strukturních měření (modrá – foliace, červená – neprůběžné pukliny, zelená – průběžné pukliny, červená čára – průběh celé viditelné plochy pukliny)



Obr. 3 Znáznornění všech měřených a vnesených struktur ve studovaném bloku v PVP Bukov (modrá – foliace, červená – neprůběžné pukliny, zelená – průběžné pukliny, černá – zlomy)

Na základě strukturních měření a vizualizací byl vytvořen 3D strukturně-geologický model zájmového horninového bloku. Model a jeho následné iterace umožnily interaktivní vizualizaci a analýzu strukturních dat a usnadnil tak plánování experimentů a vrtných prací.

Na základě modelu byla navržena optimální pozice pro charakterizační Vrt 1 (S-27) zejména s ohledem na:

- strukturní a litologickou homogenitu;
- kolmou orientaci k foliaci;
- přítomnost významné křehké struktury.

3D geologický model byl následně aktualizován s každým novým vrtem a data z něj vstupovaly do navazujících modelovacích prací. Více o tomto postupu je popsáno v části 6.2 této zprávy.

3 Návrh a realizace vrtů

Před zahájením vrtných prací byla provedena příprava pracoviště. Do zkušební komory ZK-2 byly přivedeny koleje, vytvořena železná konstrukce pro instalaci a uchycení vrtné soupravy, přivedeno osvětlení, elektrické a síťové připojení.

Na základě strukturně-geologického mapování (především měření foliací a významných křehkých struktur) byla provedena podrobná charakterizace vybraného bloku. Z výsledků byl následně proveden první 3D SG model s navrženými variantami lokace a orientace Vrtu 1 (S-27). Výběr pozice pro realizaci Vrtu 1 pak závisel zejména na faktorech, jako je strukturní a litologická homogenita (predikovatelná foliace a jednotná litologie v prvních metrech vrtu), kolmá orientace vůči foliaci (minimalizace rizika skluzu vrtné korunky), přítomnost významné křehké struktury s potenciálem pro vedení vody v blízkosti ústí vrtu (minimalizace škod v důsledku havárie vrtu, dosažitelnost vodivé struktury v prvních metrech) a na dostatečném dosahu vrtu napříč experimentálním blokem tak, aby bylo možné výsledky karotáže, SG a petrografické dokumentace jádra využít pro zpřesnění SG modelu. Po přesném vytyčení vrtu byly realizovány vrtné práce (Diamo s.p., GEAM Dolní Rožínka). Podrobné informace o realizaci a charakterizaci Vrtu 1 (S- 27) jsou součástí technické zprávy č. 2 (Zuna et al. 2020b).



Obr. 4 Příprava chodby ZK-2, instalace kolejí Obr. 5 Instalace vrtné soupravy v komoře ZK-2

Vyvrtním charakterizačního Vrtu 1 a jeho charakterizací bylo možné následně lépe pochopit propagaci významných křehkých struktur do hloubky experimentálního bloku a korelovat předpokládané petrologické charakteristiky horninového masivu v experimentálním bloku.

Hlavním cílem dílčího plnění č. 3 byla realizace Vrtu 2 (S-31) a Vrtu 3 (S-36) a jejich podrobná charakterizace. Na základě charakterizace zájmového místa byla upřesněna lokalizace a úklon vrtů S-31 a S-36. Vrtné práce byly zahájeny po ustálení tlakových poměrů ve zkušebních intervalech multipakru Vrtu 1 (S-27). V průběhu vrtných prací probíhalo měření odezvy vrtných prací v okolních vrtech a tím upřesnění propojenosti vrtů a jednotlivých puklinových systémů.

Podrobné informace o realizaci vrtů S-31 a S-36 jsou uvedeny v technické zprávě č. 3 (Zuna et al. 2021).

Po odvrtání každého vrtu byl vrt opakovaně propláchnut pomocí vrtné soupravy a následně byl propláchnut (tlakovou vodou) od dna vrtu a odčerpán pomocí Airliftu (vypláchnutí vrtné vody a kalu). Pro výplach vrtu byla využita podzemní voda z vrtu S-1.

Vrtné jádro bylo v průběhu vrtání přesně formátováno do jádrovnic a ručně orientováno (orientace značena brusným kotoučem na jádro). Po odvrtání byla jádra (jádrovnice) převezena do skladu hmotné dokumentace SURAO.

Po odvrtání vrtu se práce zaměřily na podrobnou charakterizaci vrtu (viz kap. 4). Byla provedena strukturně-geologická a petrologická analýza vrtného jádra. Makroskopicky byly vyčleněny jednotlivé litologie zastížené ve vrtu a z nich byly následně odebrány vzorky pro mikroskopickou analýzu za účelem zpřesnění litologického určení a zúžení litologické variability. Na vrtném jádru byly identifikovány a popsány jednotlivé strukturní prvky jako poruchová pásma, pukliny, foliace a reaktivované foliace. Rovněž byly jednotlivé struktury změřeny geologickým kompasem a proběhl pokus o korelaci a reorientaci těchto měření ve vztahu k prostorovému umístění vrtu. Po provedené petrologické a strukturně geologické charakterizaci bylo vrtné jádro dáno k dispozici pro odběry větších vzorků jádra k provedení dalších analytických a laboratorních prací (např. ÚJV Řež a. s, SG Geotechnika).



Obr. 6 Vrtné práce – rovnání jádra do jádrovnic



Obr. 7 Hmotná dokumentace vrtu

4 Charakterizace vrtů

4.1 Geologická charakterizace vrtných jader

Geologická charakterizace vrtných jader spočívala v makro a mikroskopickém popisu horniny a identifikaci hlavních litologických typů. Pro mikroskopický popis a zpřesnění makroskopického popisu byla pro každý vrt zhotovena sada výbrusů. Strukturní dokumentace se zaměřila hlavně na popis typu a charakteru výplně jednotlivých struktur. Vzhledem k tomu, že vrtné jádro nebylo odebráno jako orientované, bylo nutné využívat informace o orientaci strukturních dat výhradně z karotážních měření ABI40. Pro každý vrt pak byla zpracována vrtná kolonka, která obsahuje informace o popisu vrtného jádra. Podrobnosti a jednotlivé výstupy a pasporthy jsou součástí TZ 521/2020 (Zuna et al. 2020) a TZ 551/2021 (Zuna et al. 2021).

Sumarizace provedených prací je uvedena níže:

Vrt S-27:

- Identifikovány 4 hlavní litologie: biotit-amfibolická pararula, biotitická pararula, amfibolit a migmatit.
- Zdokumentováno 289 strukturních prvků (pukliny, poruchy, foliace).
- 193 strukturních prvků bylo změřeno kompasem a byl proveden test korelace s daty z ABI40 a možnost přiřazení měřených údajů puklinám.

Vrt S-31:

- Identifikovány 3 hlavní litologie: biotit-amfibolická pararula, migmatit a amfibolit.
- Zdokumentováno 350 strukturních prvků.
- 337 strukturních prvků bylo změřeno kompasem – test četnostní korelace s ABI40.

Vrt S-36:

- Identifikovány 3 hlavní litologie: biotit-amfibolická pararula, migmatit a amfibolit.
- Zdokumentováno 413 strukturních prvků.
- Měření orientace strukturních prvků na jádře již nebylo prováděno, a to na základě nepřesvědčivých výsledků z testů na vrtných jádrech S-27 a S-31 a byla využita pouze data z akustické kamery ABI 40.

Mikroskopická analýza:

- Provedena na výbrusech z odebraných vzorků.
- Sloužila k upřesnění litologického určení a zúžení litologické variability (Obr. 8).

Vrtná kolonka:

Zpracována v softwaru LogPlot7 pro každý vrt (Obr. 9).

- Lokalizace, staničení a orientace vrtu.
- Informace o litologii a strukturních prvcích.
- Výsledky měření akustickým televizorem ABI40.
- Sinusoidy pro výpočet prostorové orientace strukturních prvků z ABI40.

Vrtná jádra byla po charakterizaci uvolněna pro odběry větších vzorků pro geochemické analýzy, mechanické zkoušky a izotopové analýzy.

Lokalita: důl Rožná Hornina: migmatizovaná granát-biotitická pararula

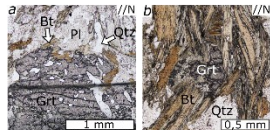
VRTNÉ JÁDRO č.: S36
METRÁŽ: 31,62 m

MAKROSKOPICKÝ POPIS: střednozrná hornina s páskovanou texturou

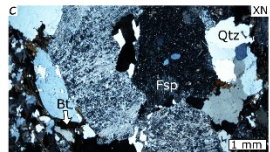
Sken výbrusu 296COG0047



Mikrofoto



a) Zrna granátu s četnými inkluzemi plagioklasu a křemene. Okraje jsou nahrazovány biotitem. Okolní hmota je křemen živcový. b) Relikt granátu v biotitovém pásku.



a) Leukosom, který je tvořen převážně sericitizovanými a kaolinizovanými živci a křemenem. V zachovávejících zrnech živec je patrné polysyntetické lamelování. V základní hmotě jsou přítomny v akcesorickém množství opaktní minerály, dosahující průměrné velikosti 0,2 mm.

Minerální asociace: Fsp, Qtz, Grt, Bt, Chl

Textura: středně zrnitá, páskovaná, lepidogranoblastická, místy porfyrická

Mikroskopický popis

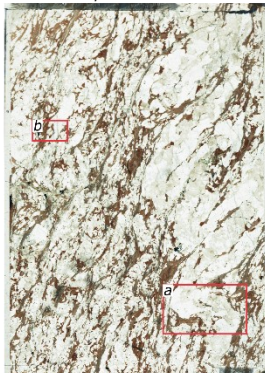
Melanosomové pásy jsou tvořeny biotitem (β, γ – tmavě oranžovo-hnědá, α – béžová) o průměrné velikosti 0,7 mm, který podléhá v různé míře chloritizaci. Obsahuje drobné inkluze radioaktivních minerálů, kolem kterých se tvoří tmavé pleochroické dvůrky. V biotitových pásčích se vyskytují zrna granátu o velikosti až 2,4 mm, které obsahují četné inkluze plagioklasu a křemene (do 1,5 mm) a která jsou po okrajích nahazována biotitem. Leukosomové pásy jsou tvořeny silně sericitizovanými a kaolinizovanými živci a dále křemenem. V zachovávejících živcích jsou patrné polysyntetické lamely. V základní hmotě jsou přítomny v akcesorickém množství opaktní minerály, dosahující průměrné velikosti 0,2 mm.

Lokalita: důl Rožná Hornina: migmatit

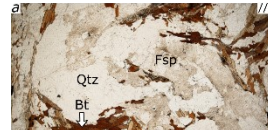
VRTNÉ JÁDRO č.: S36
METRÁŽ: 20,45 m

MAKROSKOPICKÝ POPIS: šedá, středně zrnitá, zvrásněné páskovaná hornina

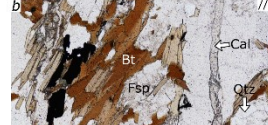
Sken výbrusu 296COG0050



Mikrofoto



Zvrásněný leukosom, který je tvořen křemenem a živci. Po okrajích ho obtékají tenké biotitové pásy představující melanosom.



Část melanosomového pásu tvořeného biotitem. V biotitu jsou tmavé pleochroické dvůrky kolem inkluzí radioaktivních minerálů. V pravé části snímku tenká žilka vyplněná kalcitem.

Minerální asociace: Fsp, Qtz, Bt

Textura: středně zrnitá se zvrásněným páskováním, lepidogranoblastická

Mikroskopický popis

V hornině se vyskytují až 2,5 mm široké, zvrásněné leukosomové pásy tvořené křemenem a živci (0,5–2 mm), které jsou obtékány tenkými pásy tvořenými biotitem (0,3–1 mm, β, γ – tmavě červeně-hnědá, α – béžová), který bývá lokálně v asociaci s šedomodrým fibrolitickým sillimanitem. Biotit podléhá chloritizaci jen v malé míře a to pouze lokálně podél okrajů. V zrnech biotitu se hojně vyskytují inkluze radioaktivních minerálů, kolem kterých se tvoří výrazné pleochroické dvůrky. V živcích lze i přes jejich sericitizaci rozeznat polysyntetické lamelování. V základní hmotě se vyskytují opaktní minerály do velikosti 0,5 mm. Horninu protínají tenké žilky ($\sim 0,2$ mm), jejich výplň je tvořena kalcitem.

Obr. 8 Příklad pasportů charakterizujících jednotlivé litologie vrtu S-36

Dokumentace vrtného jádra

Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov

Česká geologická služba, ÚJV Řež a.s., SG Geotechnika s.r.o., Progeo a.s.

MINERÁLNÍ VÝPLŇ

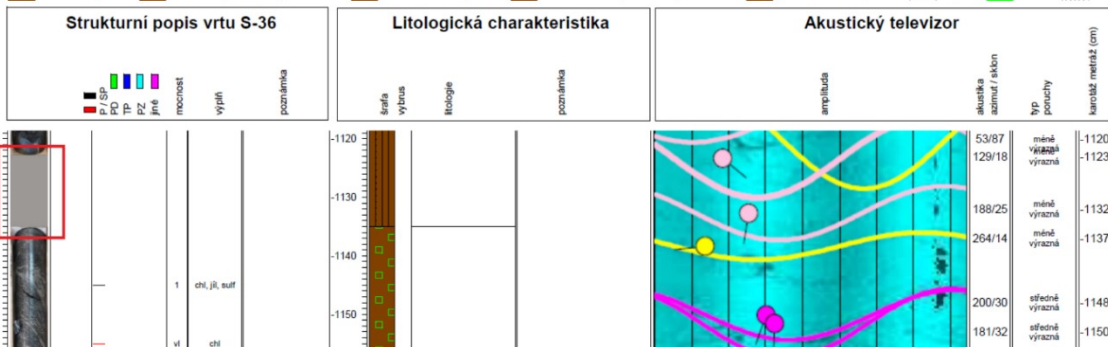
chl: chlorit; cc: kalcit; sulf: sulfid; ep: epidot; ab: albit; hem: hematit; pyr: pyrit; qz: křemen

TYP STRUKTURY / MOCNOST VÝPLNĚ

P: puklina; SP: síťová puklina; PD: podélná puklina; TP: tektonická porucha; PZ: puklinová zóna / vl: vlasová mocnost

LEGENDA LITOLOGIE

amfibolická pararula amfibolická pararula migmatizovaná biotit-amfibolická pararula biotit-amfibolická pararula migmatizovaná granát-amfibolická pararula migmatit amfibolit žilka



Obr. 9 Náhled zpracované vrtné kolonky S-36 s přidanými informacemi z akustického televizoru

4.2 Reorientace a korelace vrtného jádra dle dat z akustického televizoru

Dílním aspektem strukturně-geologického popisu vrtů bylo i otestování možnosti práce s neorientovaným vrtným jádrem a provedení jeho zpětné reorientace na základě průběhu foliačních ploch a zejména výsledků karotáží pomocí ABI a ve vrtu S-36 i OBI. Výsledky a doporučení při korelaci dat z měření na neorientovaném vrtném jádře s karotážními měřeními prováděných ve vrtech S-27, S-31 a S-36 jsou následující:

Vrt S-27

- Orientace vrtu S-27 byla měřena inklinometrií vrtu a geodetickým zaměřením ústí s předpokládaným lineárním průběhem.
- Byly zjištěny nesrovnalosti mezi těmito měřeními a lokální výkyvy kompasu inklinometrické vlivem železité sulfidické mineralizace.
- Geodetické in-situ zaměření vrtu bylo určeno jako nejkorektnější metoda s azimutem 91° a sklonem 31° . Na tento azimut byla přepočtena data z karotáže.
- Bylo provedeno přímé měření struktur na vrtu S-27 a porovnáno s daty z akustického televizoru.

Vrt S-31

- Byla provedena reorientace dat z vrtného jádra S-31 dle záznamu z akustické kamery.
- Strukturní data byla měřena geologickým kompasem ve vzorkovnicích.
- Byla zjištěna neshoda mezi orientací strukturních prvků na vrtném jádře a v záznamu z akustické kamery.
- Manuální reorientace vrtného jádra dle záznamů z ABI a měření strukturních prvků kompasem není dostačující ani přesné.
- Relevantní data pro orientaci strukturních prvků je nutné získat z korektně provedené karotáže metodou ABI.

Vrt S-36

- Byla použita metoda rozvinutého televizního obrazu (OBI) v kombinaci s akustickým televizorem (ABI).
- OBI umožňuje lépe zhodnotit tektonické poruchy, jelikož umožňuje optické srovnání mezi stěnou vrtného stvolu a vrtným jádrem.
- Strukturní charakterizace vrtného jádra je nezbytná z hlediska určení výplně, mocnosti a typu strukturních prvků.

Manuální reorientace vrtného jádra a měření strukturních prvků kompasem není s ohledem na nepřesnost a časovou náročnost doporučována.

- Kombinace karotážních metod ABI a OBI jsou stěžejní pro identifikaci strukturních prvků a určení jejich orientace.
- Strukturní charakterizace vrtného jádra je důležitá pro určení výplně, mocnosti a charakteru strukturních prvků včetně určení litologického složení.
- Vrtná kolonka slouží jako ucelený přehled o zastiženém horninovém prostředí.

Pro budoucí charakterizace a vývoj metodologie popisu vrtných jader doporučujeme:

- Upřednostňovat karotážní metody (ABI, OBI) pro získání orientace strukturních prvků.
- Používat nemagnetické centrátory (při měření ABI40).
- Využívat OBI pro detailnější hodnocení tektonických poruch jejich výplní a korelaci s vrtným jádrem.
- Kombinovat výsledky karotáží s komplexní strukturní a petrologickou analýzou vrtných jader.

4.3 Karotáž vrtů

Samotná charakterizace vrtů spočívala, mimo záznamů z ABI a OBI, zejména v širokém spektru karotážních metod, které byly ve vrtech nasazeny. Jejich hlavními cíli bylo:

- ověřit a upřesnit litologický profil sestavený podle vrtného jádra, zjistit prostorovou orientaci (úklon a směr) ploch nespojitosti (puklin nebo poruchových zón) akustickým televizorem a následně OBI,
- určit základní fyzikální vlastnosti hornin v profilu vrtu s krokem 5 cm (zejména měrnou objemovou hmotnost, přirozenou radioaktivitu hornin, měrný elektrický odpor hornin, vodivost hornin, neutronové vlastnosti, susceptibilitu a další),
- určit stupeň porušení hornin, a to jak chemického (navětrání a zvětrání), tak i tektonického porušení hornin (stanovení poruchových zón, příp. jednotlivých drobnějších puklin),
- určit základní geomechanické vlastnosti hornin na základě akustické a hustotní karotáže (objemová hmotnost, rychlost šíření podélných a příčných seismických vln, Youngův modul pružnosti hornin, smykový modul, příp. Poissonovo číslo),
- zjistit základní hydrodynamické poměry ve vrtu,
- zjistit vlastnosti kapaliny ve vrtu (měrný odpor, teplota a průzračnost),
- zjistit skutečný průměr vrtu, identifikovat otevřené pukliny, úseky nesoudržné horniny, kde došlo k vypadávání horniny ze stěny vrtu,
- zjistit prostorový průběh vrtu.

Pro splnění požadavků kladených na karotáž byl zvolen poměrně široký soubor karotážních metod, který zahrnoval:

- *optická televizní prohlídka TV* – televizní prohlídka stěn vrtu a optické ověření poruchových zón,
- *akustický televizor ABI40* – metoda v příznivých podmínkách umožňuje vydělení ploch nespojitosti v profilu vrtu (zejména puklin) a stanovení jejich prostorové orientace (úklon a azimut),
- *gamakarotáž* (přirozená radioaktivita) – pro základní rozčlenění litologického profilu,
- *neutron-neutron karotáž* (určení obsahu vody v horninách, volné i chemicky vázané v jílových minerálech – souvislost se stupněm chemického zvětrání horniny nebo porušením horniny),
- *hustotní karotáž* (určení měrné objemové hmotnosti a vyčlenění úseků porušené horniny),
- *karotáž magnetické susceptibility* (vyčlenění hornin s vyšším obsahem ferromagnetických materiálů a silně alterovaných hornin),

- *elektrokarotáž RAP010 a RAP041*) v potenciálovém uspořádání o délkách sond 41 cm a 10 cm – stanovení zdánlivého měrného elektrického odporu hornin – rozčlenění hornin podle litologie a stupně rozpukání,
- *indukční karotáž* délka sondy 50 cm a 80 cm – stanovení vodivosti hornin – rozčlenění hornin podle litologie a stupně rozpukání – metodu lze měřit i v suchých úsecích vrtů. Tato metoda v suchých vrtech a ve vrtech zapažených plastovou pažnicí nahrazuje elektrokarotáž,
- *vlnová akustická karotáž* – metoda umožňuje registraci úplných vlnových obrazů a vyhodnocení rychlosti podélných a příčných vln, což v příznivých podmínkách vede k výpočtu Poissonova čísla a dalších geomechanických modulů (Youngova modulu ED_{ALT} a smykového modulu GD_{ALT}),
- *kavernometrie* – měření průměru vrtu, zjištění otevřených puklin a úseků nestabilní horniny,
- *inklinometrie* – měření prostorového průběhu vrtu inklinoměrem se spojitým záznamem úklonu a azimutu,
- *termometrie* spojitě měření teploty vody ve vrtu, slouží pro zjištění míst přítoků nebo ztrát,
- *rezistivimetrie* stanovení elektrického měrného odporu vrtné kapaliny – konduktivity,
- *soubor rezistivimetrických metod pro hydrogeologii a to: rezistivimetrie metodou filtrace*. Přítoky do vrtů (hydrogeologické poměry) byly zjišťovány metodou ředění označené kapaliny.

Na základě vybraných geofyzikálních metod byl karotážní profil rozčleněn do pěti kategorií dle stupně porušení horniny. Měření optického (OBI) a akustického (ABI) televizoru byla určena orientace všech ploch nespojitosti, které následně sloužily pro aktualizaci strukturního 3D modelu zájmového bloku. Pomocí karotážního měření byla v obou vrtech ověřena místa přítoků za neporušených hydraulických podmínek. Dále byly poskytnuty údaje o technickém stavu vrtu a o jeho prostorové orientaci (Zuna et al. 2021).

4.4 Závěry z charakterizačních metod

Z provedených tří metod (měření struktur přímo na stěnách PVP Bukov, měření struktur přímo na vrtném jádru a měření struktur akustickým televizorem) byly vyvozeny tyto závěry:

- 1) Ani jedna metoda sama o sobě neukáže reálný stav kompletní puklinové sítě;
- 2) omezením měření na stěnách v jednom patře dolu je nemožnost měřit subhorizontální pukliny v reálné četnosti;
- 3) omezením přímého měření na vrtném jádru je zanedbání strmých puklin probíhajících paralelně s dlouhou osou vrtu;
- 4) omezení přímého měření na vrtném jádru je také často v přesnosti měření jednotlivých struktur, které může být lehce nepřesné ve sklonu i azimutu z důvodu malé plochy k měření. Výhodou je mít k dispozici dataset změřený přímo na stěnách podzemního díla pro následnou korelaci a opravu dat. Možným řešením je orientované vrtání, kde je možné určit přesnou pozici a orientaci jádra vůči průběhu vrtu (azimut a sklon);
- 5) omezením karotážní metody akustického televizoru je nemožnost odlišit z výsledných dat subparalelní pukliny od foliací a rovněž velká četnost foliací vzhledem k ostatním

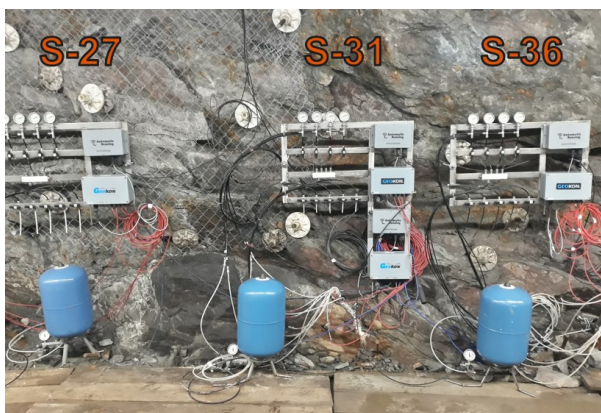
strukturám;

- 6) omezení karotáže spočívá také v tom, že je nesmírně důležité si být jistý orientací vrtu, což je číslo, které následně vstupuje do výpočtu orientací jednotlivých struktur / nehomogenit a ty jsou následně důležité pro porovnání s přímo měřenými strukturními daty. Data z karotáže jsou rovněž vstupními daty do 3D modelu a je nutné si být jistý jejich orientací;
- 7) jako ideální se jeví komparativní studie na základě všech 3 metod, provedená alespoň na dvou semi-paralelních vrtech, která při zohlednění všech omezení umožní vykreslit reálné parametry puklinové / poruchové sítě v 3D prostoru;
- 8) jako doplňující metody k výše uvedenému postupu lze využít komparaci dat OBI, ABI a skenu vrtného jádra. Všechny tyto metody umožňují vykreslit zachycené poruchy pomocí sinusoid a lze je tedy vzájemně porovnat. Podmínkou pro správnou interpretaci dat z těchto metod je zcela přesné změření azimutu a sklonu vrtu a následné zorientování vrtného jádra, ať už pomocí specializovaného nástroje pro orientované vrtání, či kombinací metod uvedených v této kapitole (inklinometrie, zaměření vrtací soupravy kompasem; geodetické zaměření ústí vrtu).

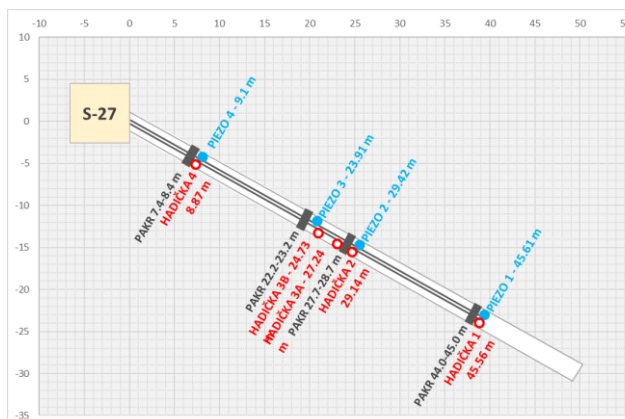
5 Multipakrový a měřicí systém – monitoring

Další činnosti byly zaměřeny na vývoj a výrobu multipakrového systému. Multipakrový systém do vrtů S-27, S-31, S-36 a S-8 se skládá z následujících komponent: 4× nerezový pakr společnosti Geopro, 4× tlaková průchodka, nerezové trubky a měřicí ústředna (Pozn.: u vrtu S-8 byly použity 2 pakry a tlakové průchodky). Pod každým pakrem je umístěna tlaková průchodka, která obsahuje čtyři vývody. Toto řešení umožňuje v testované etáži současně měřit tlak podzemní vody a vzorkovat vodu ze dvou různých míst. Tlakování pakrů je zajištěno pomocí polyamidových trubiček vnějšího a vnitřního průměru 6 a 3 mm (do 100 bar). Do prostoru mezi pakry je vyvedena polyamidová trubička vnějšího a vnitřního průměru 6 / 4 mm (do 58 bar) určená pro injektáž nebo odběr vody. K monitoringu tlaků slouží vibrační strunové piezometry společnosti Geokon model 4500C s průměrem 11 mm a rozsahem 7 bar umístěných přímo do prostoru vrtu mezi pakry. Data se po každém měření ukládají ve vnitřní paměti měřicí ústředny a zároveň se odesílají on-line přes vzdálený přístup.

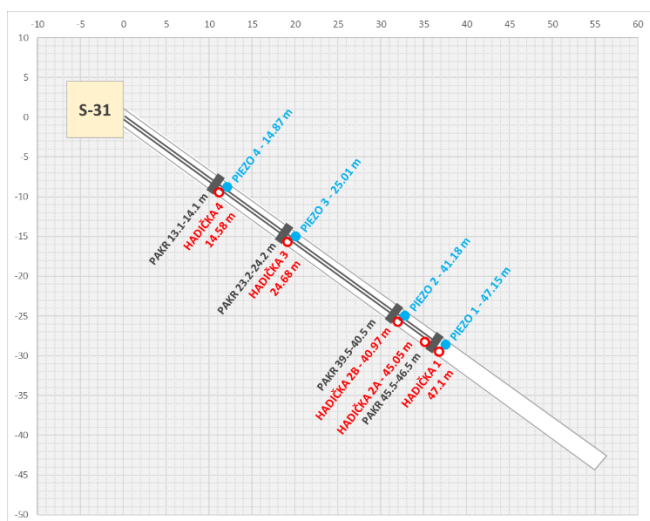
Na základě výsledků hydraulických testů, karotážních metod a interpretovaných geologických modelů byly vybrány vhodné intervaly pro konstrukci multipakrových systémů. Multipakrové systémy byly úspěšně nainstalovány v chodbě ZK-2 do vrtů S-27, S-31 a S-36 s vymezenými intervaly (4 měřicí intervaly). Tyto intervaly byly využity pro měření tlakových poměrů a následně realizované hydraulické a transportní zkoušky. V průběhu hydraulických testů probíhalo měření tlakových poměrů v multipakrových systémech.



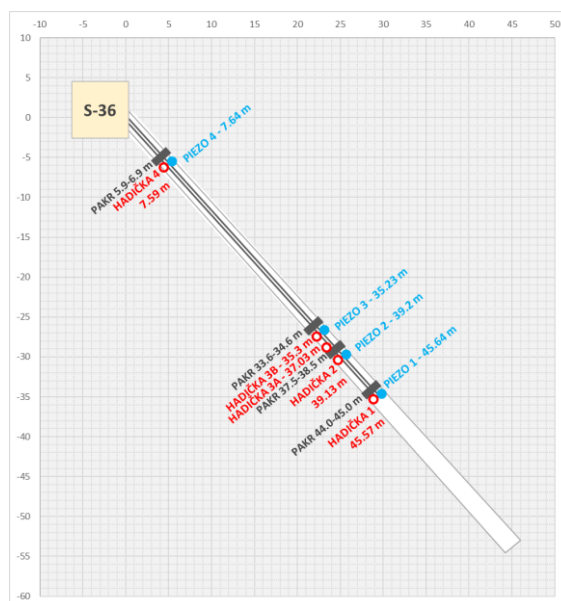
Obr. 10 Kontrolní a ovládací panely vrtů S-27, S-31, S-36 v rozrážce ZK-2



Obr. 11 Schéma multipakru ve vrtu S-27



Obr. 12 Schéma multipakru ve vrtu S-31



Obr. 13 Schéma multipakru ve vrtu S-36

Tab. 2 Detaily osazení multipakru S-27

Pakr	Hloubka těsnící části (m)	Hloubka piezometru (m)	Hloubka injektážní hadičky (m)	Délka injektážní hadičky (m)
1	44,00–45,00	45,61	45,56	46,50
2	27,72–28,72	29,42	29,14	30,20
3	22,19–23,19	23,91	27,24	28,80
			24,73	25,50
4	7,42–8,42	9,10	8,87	10,00

Tab. 3 Detaily osazení multipakru S-31

Pakr	Hloubka těsnící části (m)	Hloubka piezometru (m)	Hloubka injektážní hadičky (m)	Délka injektážní hadičky (m)
1	45,50–46,50	47,15	47,10	48,00
2	39,52–40,52	41,18	45,05	46,30
			40,97	42,00

3	23,24–24,24	25,01	24,68	25,50
4	13,14–14,14	14,87	14,58	15,50

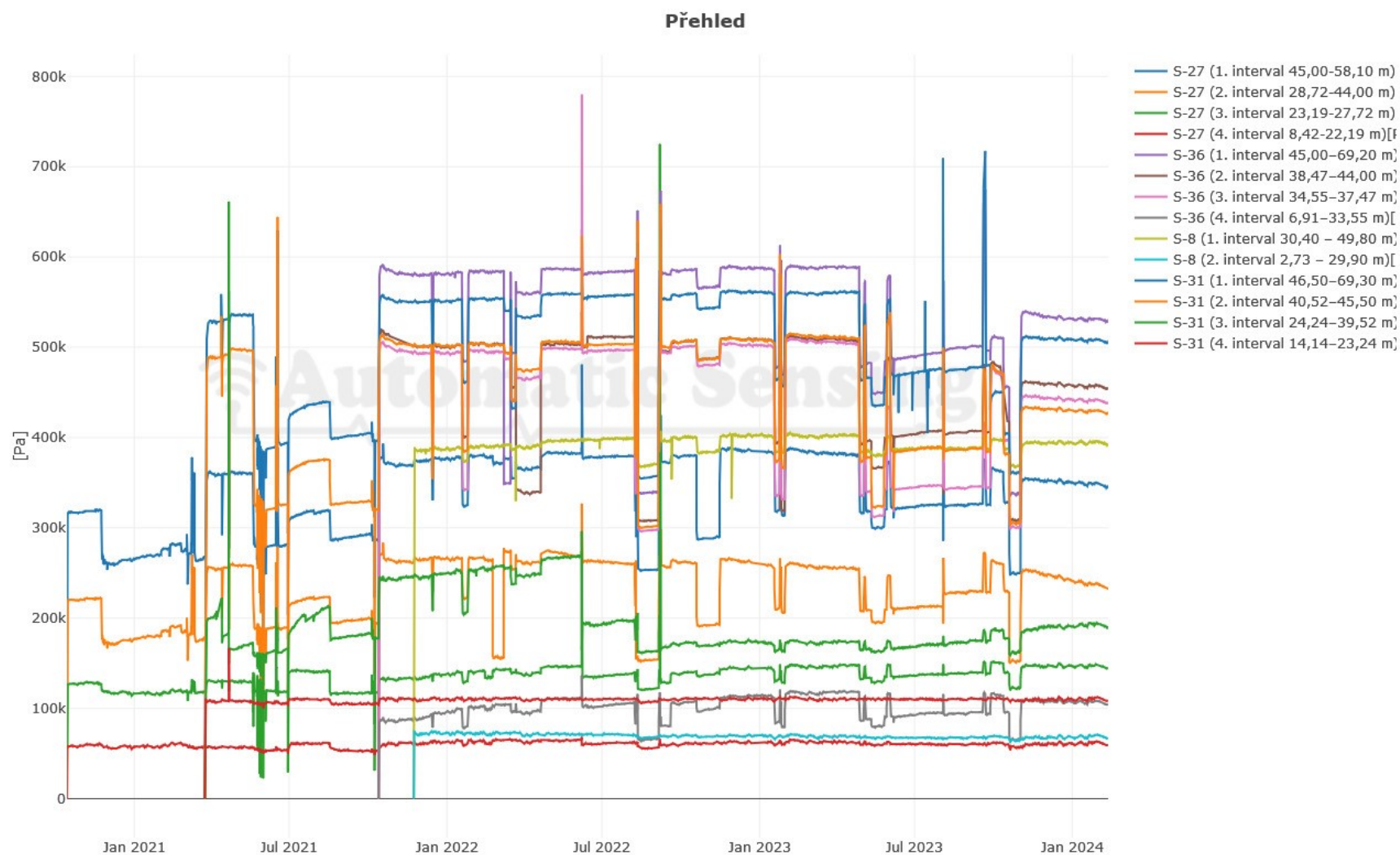
Tab. 4 Detaily osazení multipakru S-36

Pakr	Hloubka těsnící části (m)	Hloubka piezometru (m)	Hloubka injektážní hadičky (m)	Délka injektážní hadičky (m)
1	44,00–45,00	45,64	45,57	48,00
2	37,47–38,47	39,20	39,13	42,00
3	33,55–34,55	35,23	37,03	39,00
			35,30	37,00
4	5,91–6,91	7,64	7,59	12,00

Tab. 5 Detaily osazení multipakru S-8

Pakr	Hloubka těsnící části (m)	Hloubka piezometru (m)	Hloubka injektážní hadičky (m)	Délka injektážní hadičky (m)
1	29,90–30,40	30,94	30,98	36,00
2	2,23–2,73	3,37	3,43	10,00

Monitoring tlaků probíhal téměř 3,5 roku (od instalace po konec projektu). Vedle dat tlaku podzemní vody z intervalů byl měřen i atmosférický tlak a teploty v intervalech a zkušební komoře (Obr. 14).



Obr. 14 Monitoring tlaků – reakce na hydraulické testy a stopovací zkoušky

6 Model zájmového bloku horniny

V rámci řešení projektu byl sestaven geologický, hydrogeologický a transportní model zkoumaného bloku horniny, který byl postupně aktualizován a zpřesňován na základě dostupných dat z charakterizačních prací a realizovaných hydraulických a stopovacích testů.

6.1 Koncepční model zájmového bloku horniny

Popis tvorby koncepčního geologického (Geo) a hydrogeologického (Hydro) DFN modelu je detailně popsán v průběžné technické zprávě TZ 551/2021 (Zuna et al. 2021). Cílem 12. etapy projektu bylo na základě omezených vstupních dat (především archivních z dřívějších terénních prací a monitoringu, ale také z nově realizovaných vrtů) navrhnout koncepci modelu zájmového bloku horniny v PVP Bukov, který poslouží jako nástroj pro plánování vrtných prací a experimentů, které jsou nezbytné pro hlubší pochopení vlastností horninového prostředí a jeho chování.

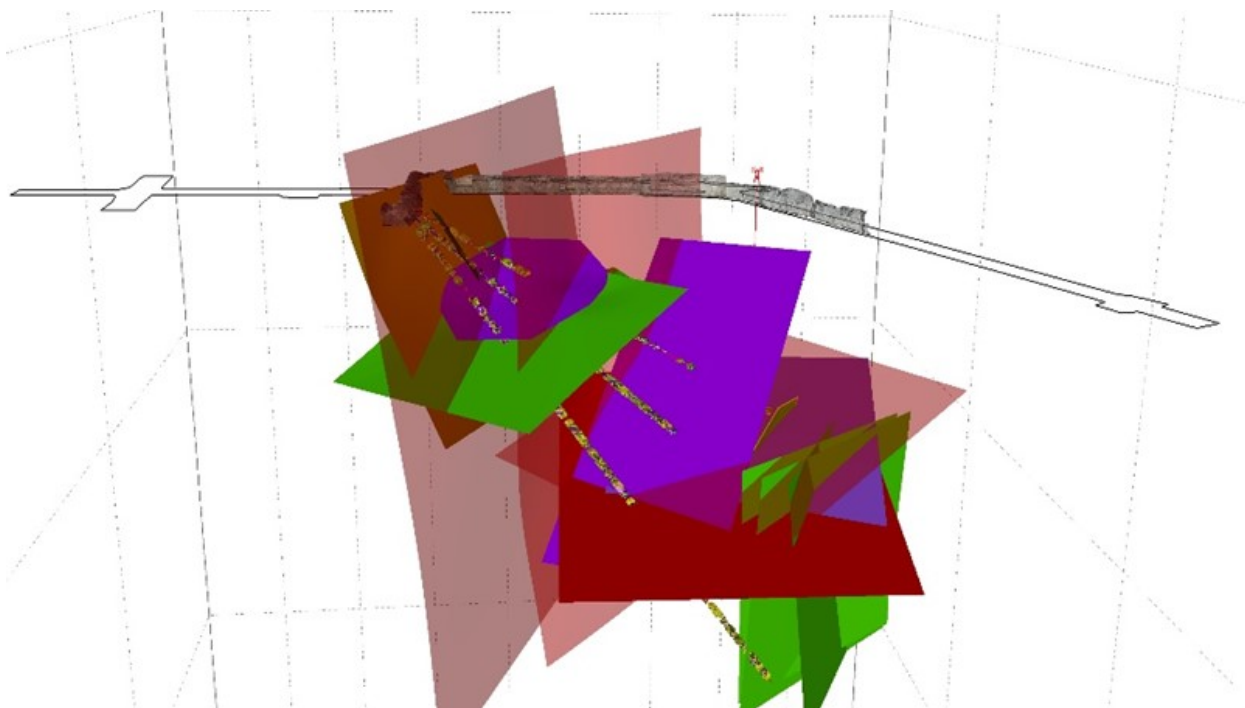
6.1.1 Geologický model

Pro konstrukci geologického modelu byl použit software MOVE. Model zahrnuje oblast o rozměrech $40 \times 60 \times 60$ m a integruje data z různých zdrojů (Obr. 15):

- **Strukturní měření:**
Podrobné mapování a měření orientace strukturních prvků (zlomy, foliace, pukliny) na stěnách chodeb v daném bloku. Bylo zdokumentováno a digitalizováno cca 250 strukturních měření, s důrazem na přesnou orientaci a charakteristiky puklin (typ, délka, zakončení).
- **Karotážní data:**
Výsledky akustického televizoru z vrtů S-27 a S-31, které poskytují detailní informace o struktuře a vlastnostech horniny podél vrtných profilů. Karotážní data zahrnují akustické obrazy stěn vrtu, z nichž je možné interpretovat výskyt a vlastnosti puklin, foliace a dalších geologických struktur.

Deterministické struktury

Model zahrnuje reprezentaci významných deterministických struktur, jako jsou zlomy, reaktivované foliace anebo poruchová pásma. Tvorba těchto struktur probíhá v programu MOVE s využitím různých metod, jako je extrapolace strukturních měření, tvorba stuh (ribbons) a plošné extenze. Byly identifikovány a modelovány 3 hlavní zlomy a 2 poruchová pásma, které ovlivňují hydrogeologické vlastnosti bloku. Foliace byla rozdělena do 3 generací dle orientace a charakteru. Litologicky byl model rozdělen na 3 hlavní typy hornin: biotit-amfibolická pararula, migmatit a amfibolit.



Obr. 15 3D model s vynesnými strukturními daty pro všechny provedené vrty a meshe ploch významných poruchových zón identifikovaných akustickou kamerou ve vrtech a jejich propojení s významnými strukturami na stěnách chodeb

Stochastický DFN model

Pro simulaci puklinové sítě v daném bloku byl vytvořen stochastický DFN model s využitím programu DFraM (Obr. 16) (Švagera et al. 2017). Model rozlišuje 5 populací puklin na základě jejich orientace (sklon a směr). Pro každou populaci jsou definovány parametry, jako je hustota puklin, jejich délkové a orientační rozdělení a charakter ukončení. Bylo analyzováno 425 stop puklin z mapování, které byly rozděleny do 5 populací s ohledem na jejich orientaci a charakter ukončení. Pro každou populaci byly stanoveny statistické parametry délky a hustoty puklin (Tab. 6 a Tab. 7).

Tab. 6 Parametry DFN sítě zobrazující střední průběh (strike), sklon (dip) polohu středu klastru dat (μ_x, μ_y, μ_z) a koncentrační parametr (κ) pro jednotlivé populace

Pop	n	Strike	Dip	μ_x	μ_y	μ_z	κ
1	113	15.14	89.55	-0.965	0.261	-0.008	15.852
2	119	63.56	89.47	0.445	-0.895	0.009	8.808
3	126	312.05	83.34	0.665	0.738	0.116	8.926
4	35	109.31	42.69	-0.224	-0.640	0.735	21.381
5	23	130.87	8.87	-0.101	-0.117	0.988	15.438

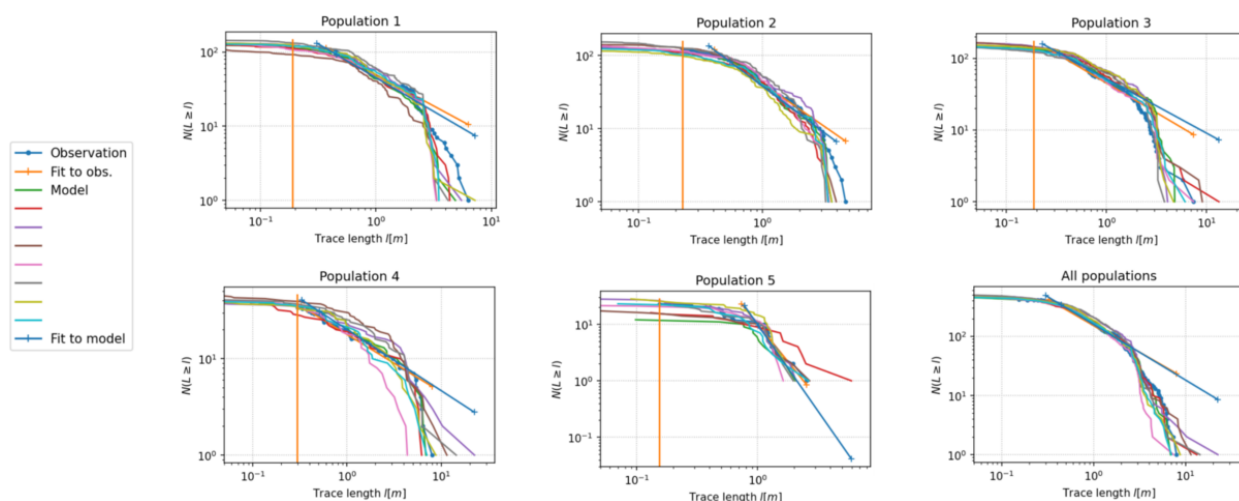
Tab. 7 Parametry DFN sítě určující minimální velikost poloměru kružnice opsané v jedné puklině (x_{min}), koncentrační parametr (α) a hustotu puklin na m^3 (P_{30})

Populace	1	2	3	4	5
x_{min} [m]	0.406	0.491	0.315	0.379	0.757
α [-]	3.221	3.594	3.029	2.771	4.651
P_{30} [$\frac{1}{m^3}$]	0.335	0.339	0.552	0.067	0.037

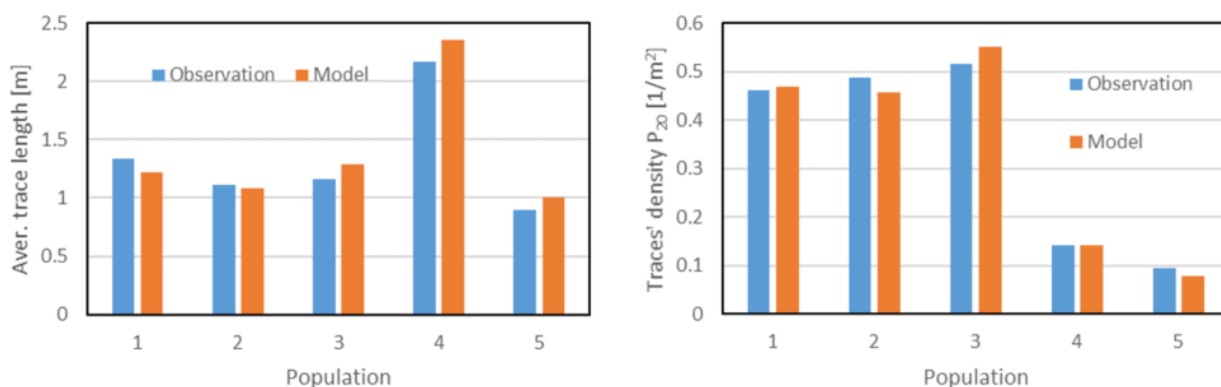


Obr. 16 Jedna z realizací DFN modelu v prostředí programu ParaView

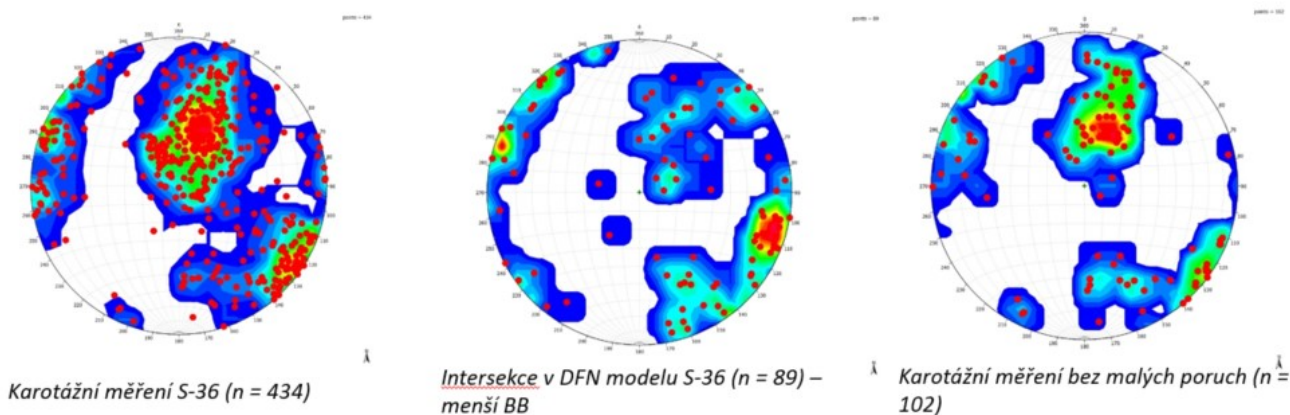
Validace DFN modelu zahrnuje porovnání s pozorovanými daty z mapování a vrtných profilů (Obr. 17 a Obr. 18). Klíčovým aspektem je analýza průsečíků puklin s vrty a korelace s karotážními daty. Výsledky validace prokazují dobrou shodu mezi modelem a realitou, čímž potvrzují jeho spolehlivost pro další analýzy. Bylo provedeno porovnání simulovaných a pozorovaných frekvencí a délek puklin, s dobrým souladem pro všechny populace. Průsečíky puklin s vrty byly analyzovány a korelovány s karotážními daty, s potvrzením realistické reprezentace puklinové sítě v modelu (Obr. 19).



Obr. 17 Grafy porovnání četností a délek stop na pozorovacích oknech a vypočtených modelem pro jednotlivé populace spolu s proloženými křivkami ideálního fitu



Obr. 18 Porovnání průměrné délky stop puklin a jejich hustoty mezi přímým terénním pozorováním (modré sloupce) a realizací DFN modelu (oranžové sloupce)

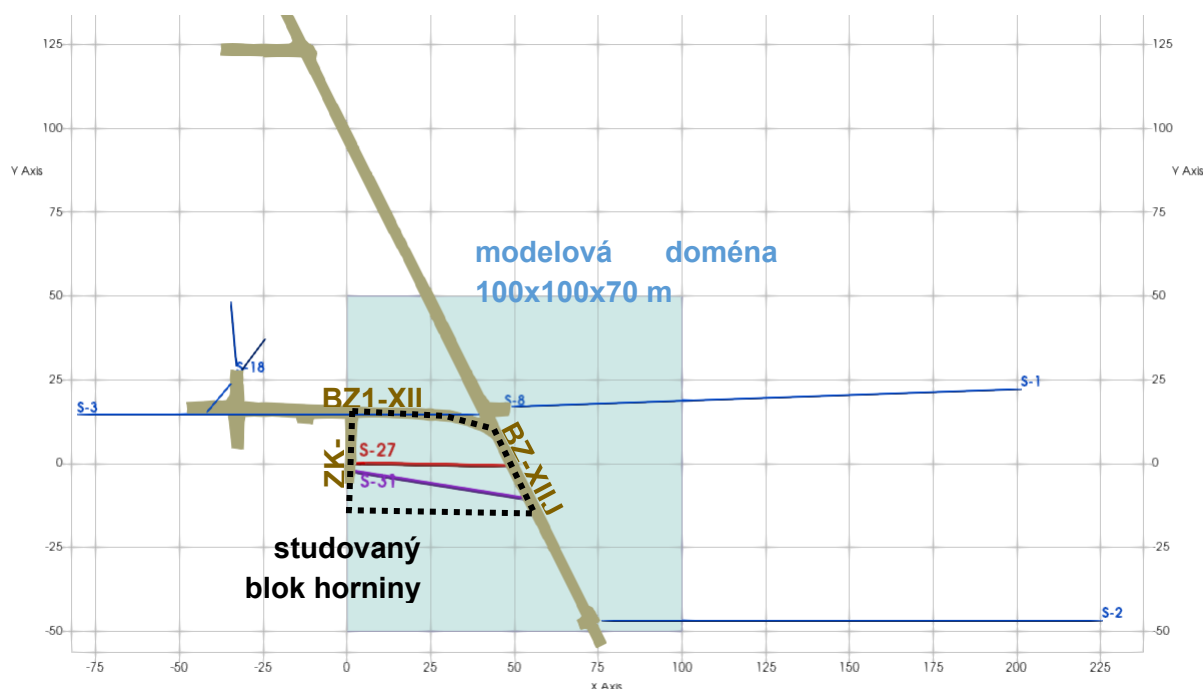


Obr. 19 Srovnání pólů ploch diskontinuit měřených metodu ABI40 a intersekcí vypočteného DFN modelu na virtuálním vrtnu a patrná shoda při odfiltrování velmi drobných poruch a/nebo foliací z karotážních měření projekce pólů ploch na spodní hemisféru ve Schmidtově plochojevném zobrazení

Koncepční model umožňuje detailní vizualizaci a analýzu geologické stavby bloku. Poskytuje cenné informace o rozmístění a charakteru strukturních prvků, puklinové sítě a litologických variací. Tyto informace sloužily jako podklad pro plánování experimentů, optimalizaci rozmístění měřicích zařízení a hydrogeologických testů s ohledem na geologické heterogenity a hydrogeologické parametry.

6.1.2 Hydrogeologický model

Hydrogeologický model zájmového bloku horniny (Hydro-DFN) byl koncepčně navržen ve stejném měřítku a rozsahu jako Geo-DFN model vymezený rozrážkami BZ1-XII, BZ-XII-J a ZK2 s mírným přesahem za hranici studovaného bloku, viz Obr. 20. Hlavním důvodem pro rozšíření modelové domény bylo zadání neovlivněných okrajových podmínek na hranici hydrogeologického modelu. Hydro-DFN model bloku horniny je zpracován v DFN modulu programu ConnectFlow (dříve NAPSAC).



Obr. 20 Vymezení studovaného bloku horniny (černě čárkovaně) a rozsahu modelové domény Hydro-DFN modelu (modře)

Geometrie puklinové sítě

Sestavení Hydro-DFN modelu po stránce geometrické (velikost, počet, tvar puklin) navazuje přímo na výstupy z Geo-DFN modelování, které jsou primárním vstupem pro Hydro-DFN modelování. Geometrie puklinové sítě v horninovém bloku je rozdělena na dvě oblasti:

- 1) puklinová síť v centrální oblasti studovaného bloku horniny – hranice tohoto bloku horniny je pevně vymezena a zahrnuje primárně deterministicky definované pukliny vymapované na základě provedených terénních prací (rozrážky, nové vrtý). Současně model studovaného bloku horniny zahrnuje stochastické puklinové datasey reprezentující křehké porušení horniny. Stochasticky (nedeterministicky) jsou zadány také některé větší poruchy, které doplňují puklinovou síť v místech, kde chybí data a kde nejsou zadány

deterministicky definované pukliny. Částečně stochasticky (semi-) mohou být definovány i „deterministické“ pukliny, tj. z charakterizace je zadán průsečík, sklon a směr puklin, zatímco jejich velikost je generována náhodně. Geometrie puklinové sítě v oblasti studovaného bloku horniny je připravena a vygenerována v rámci prací na Geo-DFN modelu a do Hydro-DFN modelu je přebírána, včetně všech realizací.

- 2) puklinová síť v obalové zóně (buffer) kolem studovaného bloku horniny pro potřeby zadání okrajových podmínek - vnější zóna obsahuje pouze stochasticky generované pukliny s parametry datasetů zadanych do centrální oblasti studovaného bloku horniny. Z výpočetních důvodů je puklinová síť v této vnější zóně zjednodušena – např. pro snížení počtu průsečíků puklin a zrychlení výpočtu jsou zahrnuty pouze větší pukliny. Geometrie stochastické puklinové sítě v obalové zóně studovaného bloku horniny je přímo generována v programu ConnectFlow.

Hydraulické parametry puklinové sítě

Hodnoty transmisivity (respektive hydraulického rozevření) vodivých puklin jsou v modelu kalibrovány na základě výsledků měření multipakrového systému, vodních tlakových zkoušek apod. Konceptní postup je takový, že v základní modelové variantě je přiřazováno konstantní hydraulické rozevření v celé ploše pukliny, v závislosti na velikosti pukliny se ale může měnit (podle mocninného rozdělení) – rozdělení parametrů hydraulického rozevření je předmětem kalibrací modelu. Pokud se nepodaří model kalibrovat pomocí konstantního rozevření v ploše pukliny, je v navazujících modelových variantách použito variabilní rozevření puklin. Zadání variabilního rozevření je předpokládáno jen u větších strukturních prvků nebo u prvků se známým průběhem zadávaných deterministicky. Variabilní rozevření je v ploše pukliny generováno pomocí pravděpodobnostních funkcí dostupných a implementovaných přímo v programu ConnectFlow, případně pomocí skriptů nebo jiných nástrojů (např. GStools).

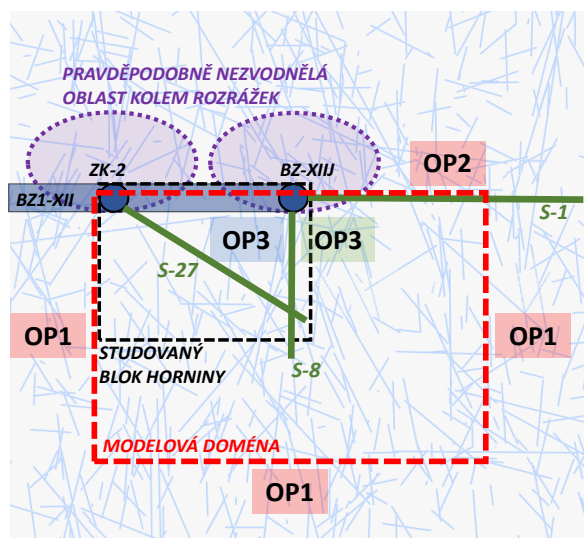
Vymezení okrajových podmínek na hranici modelu

Zatímco prostorové vymezení bloku horniny pro vytvoření geologického modelu je v podstatě jednoznačné (blok horniny, ve kterém probíhají vrtné práce), je vymezení hydrogeologického modelu složitější, protože je potřeba zohlednit režim proudění podzemních vod přítékajících do zájmového bloku z horninového masivu. Celá oblast PVP Bukov je intenzivně drénována nejen díky tunelu a rozrážkám, ale i díky starším otevřeným vrtům – především dlouhé vrty S-1 a S-2 odvádí z horniny velké množství podzemní vody a spolu s dalšími vrty S-8 a S-18 propojují puklinovou síť v blízkosti studovaného bloku a deformují tlakové pole. Na základě měření multipakrového systému v prvním realizovaném vrtu S-27 byl zjištěn ve vzdálenosti 25 m od rozrážky tlak pouze 0,5 m nad ústím vrtu. Hornina a pukliny nemusí být v okolí rozrážky (do vzdálenosti cca 20–30 m) plně zvodnělé, což může komplikovat jak prováděné experimenty a testy (bude nejprve docházet k plnění volného prostoru), tak i modelové práce (nesaturované pukliny mají zcela jiné parametry).

Jako jeden z důležitých podkladů pro vymezení okrajových podmínek chybí komplexní hydrogeologické zhodnocení podzemního pracoviště PVP Bukov, které by se dalo využít jako podklad pro detailní práce na menším bloku horniny (stávající monitoring sbírá data, ale nehodnotí je v souvislostech). Nastavení okrajových podmínek, tj. přítoků z horninového masivu (návrh viz Obr. 21), bylo zpřesňováno dle výsledků z měření tlaků a výtoků z vrtů při hydraulických testech. Rozrážky a otevřené vrty, které drénují celou strukturu a odtéká jimi podzemní voda z modelového bloku, jsou zadány tlakovou okrajovou podmínkou – hodnota hydraulické výšky odpovídá geodetické výšce. Vrty i rozrážky jsou v modelu zadány jako inženýrské objekty typu

„borehole“ a „shaft“ (nikoliv pomocí puklin). Měřená hodnota výtoku z puklin a z vrtů do rozrážky je použita jako kalibrační parametr při ladění modelu.

Při simulaci hydraulických testů nebo vodních tlakových zkoušek je využita okrajová podmínka známého toku nebo tlaku, přičemž je vždy zadána pouze jedna z hodnot a druhá je použita při kalibraci modelu.



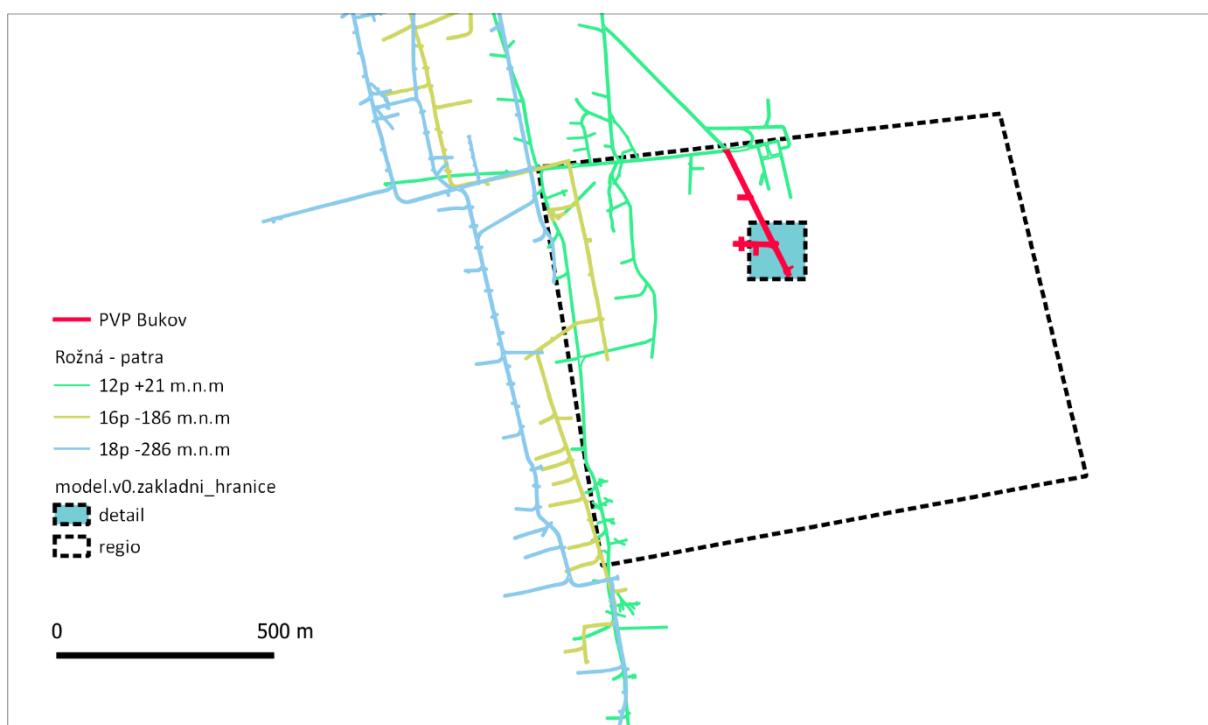
- OP1 – přítok do zájmového bloku horniny – typ okrajové podmínky (konstantní tlak nebo tok) bude upřesněn až v průběhu realizace modelu
- OP2 – pravděpodobně nulový tok přes horní hranici (bude také upřesněno v průběhu realizace modelu)
- OP3 – tlaková okrajová podmínka v rozrážkách a otevřených vrtech ($H = 21\text{ m}$)

Obr. 21 Schématické vykreslení okrajových podmínek Hydro-DFN modelu

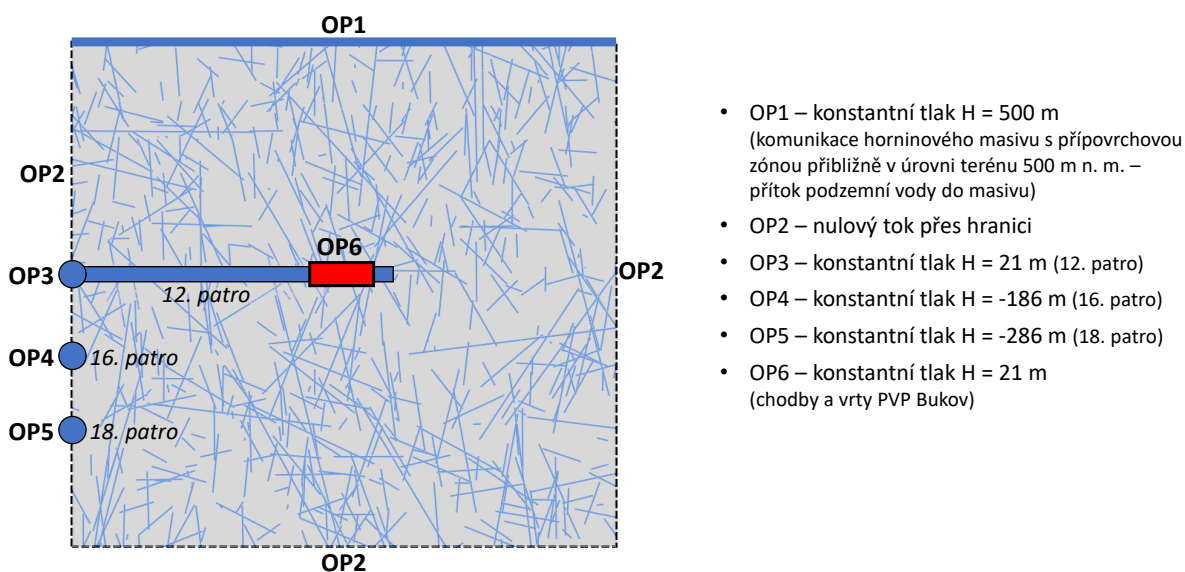
Hydrogeologický model regionálního charakteru

Při zpracování detailního Hydro-DFN modelu zájmového bloku byl současně realizován zjednodušený „regionální“ model okolí PVP Bukov – pro zadání okrajových podmínek a celkového přítoku na hranici Hydro-DFN modelu zájmového bloku horniny. Model zahrnuje širší okolí dolu Rožná, zhruba do vzdálenosti 500 m od PVP Bukov, viz Obr. 22, a je napojen na detailní puklinovou síť zájmového bloku horniny.

Z hlediska geometrie a okrajových podmínek (Obr. 23) je „regionální“ model významně zjednodušený, nicméně zahrnuje hlavní bilanční prvky lokality – tj. přetok vody z přípovrchové zóny do horninového masivu a drenáž do důlního díla.

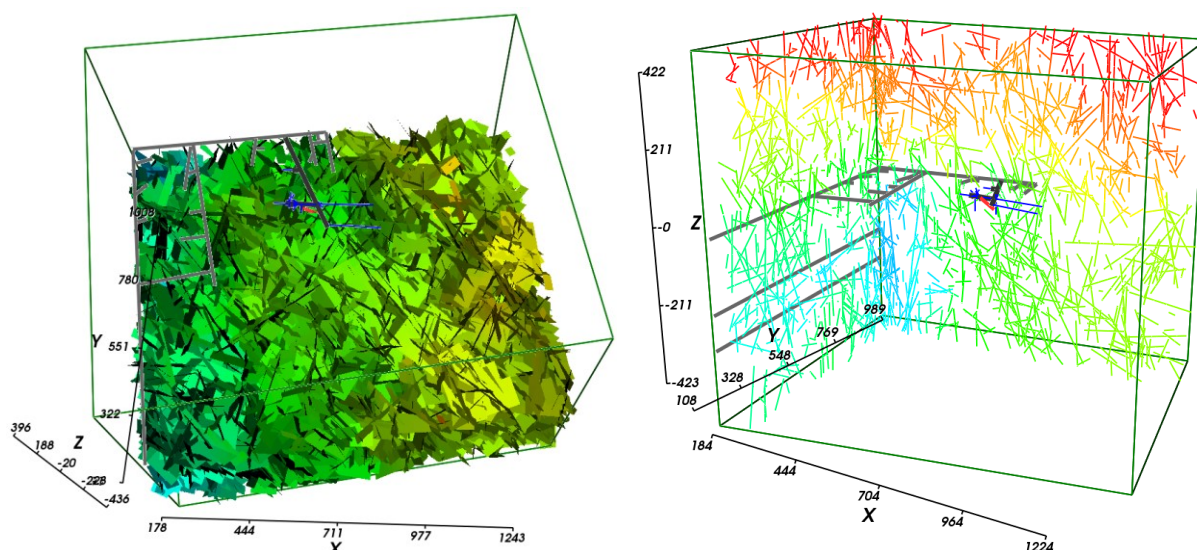


Obr. 22 Situace doplňujícího modelu regionálního charakteru



Obr. 23 Schématické vykreslení okrajových podmínek regionálního modelu

„Regionální“ model byl primárně zpracován jako DFN puklinový model v programu ConnectFlow. Geometrické parametry puklinové sítě byly převzaty z předchozích prací. Hydraulické parametry puklin byly optimalizovány při kalibraci modelu na měřené celkové přítoky do PVP Bukov (monitoring SÚRAO) a měřené tlaky v nových vrtech S-27 a S-31. V Obr. 24 je vykreslen řez modelovou doménou a puklinovou sítí regionálního modelu.



Obr. 24 Řez regionálním Hydro-DFN modelem v úrovni PVP Bukov – rozsah regionálního modelu $1200 \times 1000 \times 1000$ m zahrnuje také část 12., 16. a 18. patra dolu Rožná

6.2 Základní numerický model

Zpracování základního numerického modelu bylo realizováno v rámci etapy 21 a je detailně popsáno v průběžné technické zprávě č. 630/2022. Podkladem pro sestavení základního modelu byl navržený koncepční model a nově získaná strukturní data z vrtů.

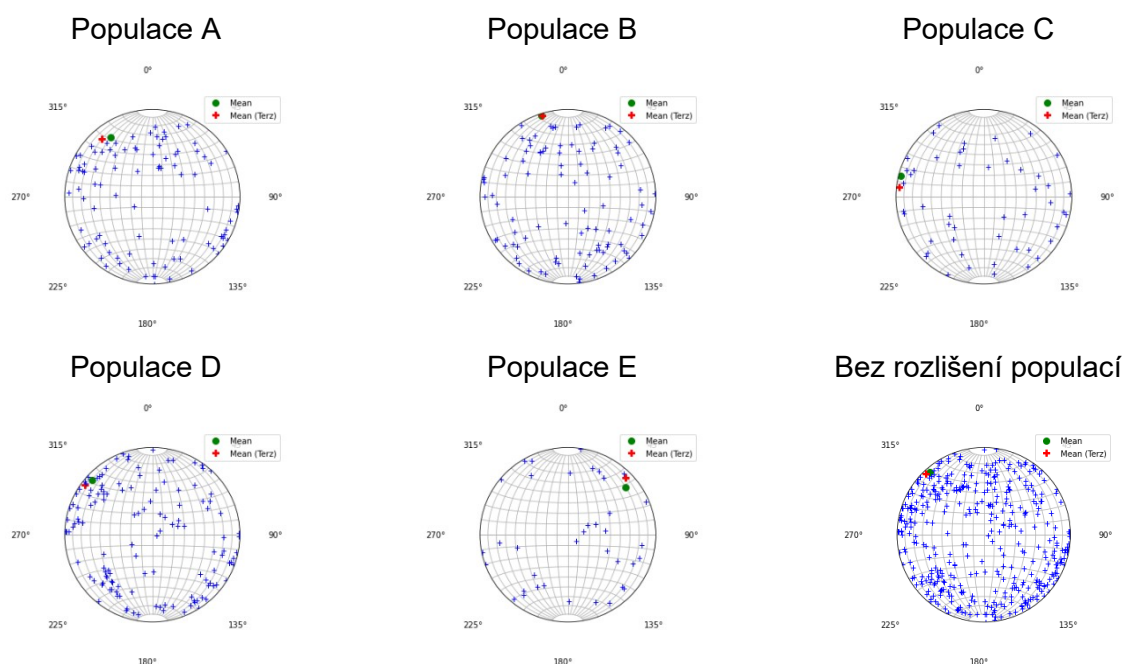
6.2.1 Identifikace parametrů a generování stochastického sGeoDFN modelu (verze k01)

Pro identifikaci parametrů modelu byla použita strukturně-geologická data měřená ČGS. Tato data zahrnovala soubor dat s vrcholy celkem 8 pozorovacích oken umístěných na stěnách chodeb. Dále pak soubor dat s informacemi o 416 puklinách zaměřených na pozorovacích oknech. Záznam pro každou puklinu obsahoval mimo jiné její identifikátor, sklon a směr průběhu pukliny, souřadnice koncových bodů stopy, informace o ukončení pukliny, identifikátor pozorovacího okna a zařazení pukliny do geologické populace.

Statistické testy modelů orientace puklin

Pro jednotlivé puklinové populace bylo nutné ověřit, zda lze jejich orientaci modelovat pomocí obvykle používaného Fisherova rozdělení, případně s využitím jiného statistického modelu.

Data byla nejprve rozdělena do pěti populací (A–E) (Obr. 25) na základě typu ukončení stop. Statistické testy ukázaly, že žádná z těchto populací nevykazuje dominantní orientaci a data spíše odpovídají pásovému (ekvatoriálnímu) rozdělení s nízkou koncentrací. Hypotéza rovnoměrného rozdělení byla zamítnuta pro všechny populace.



Obr. 25 Stereogramy pólů puklin pro populace A–E definované podle typu ukončení stop

Dále byly pukliny rozděleny do pěti populací (1–5) (Obr. 26) na základě dominantní orientace. Stereogramy pólů puklin ukázaly klastrový charakter rozdělení pro všechny populace. Analýza směrové matice potvrdila klastrový charakter se střední koncentrací okolo dominantního směru. Hypotéza rovnoměrného rozdělení byla opět zamítnuta pro všechny populace.



Obr. 26 Stereogramy pólů puklin pro populace 1–5 definované podle dominantní orientace

Z provedené analýzy vyplývá, že pokud jsou pukliny zkoumaného horninového bloku rozděleny do populací výhradně podle typu ukončení stop, pak jednotlivé populace nesplňují kritérium pro model rovnoměrného rozdělení a vykazují spíše charakter pásového (ekvatoriálního) rozdělení, avšak se slabou směrovou koncentrací. Při tvorbě sGeoDFN modelů bylo tedy dále pracováno

s rozdělením puklin do populací 1–5, které byly určeny na základě dominantních orientací podle metodiky (Kabele et al. 2017) a (Švagera et al. 2017), vykazující bipolární charakter se střední koncentrací, a jsou proto dobře popsitelné pomocí Fisherovy distribuce (Fisher et al. 1993).

Analýza ukončování puklin

Byla provedena základní analýza ukončování puklin mezi jednotlivými populacemi. Bylo zjištěno, že populace A–E byly správně definovány podle způsobu ukončování stop, avšak u nich nelze spolehlivě určit hierarchii s ohledem na ukončování.

Určení parametrů Fisherova rozdělení pro populace 1–5

Parametry Fisherova rozdělení pro populace 1–5 byly určeny jako odhady s největší věrohodností s ohledem na Terzaghiho korekci (Terzaghi 1965). Rozdíl mezi hlavními směry s a bez korekce byly minimální.

Určení objemové hustoty a parametrů mocninného rozdělení puklin pro populace 1–5

Objemová hustota a parametry mocninného rozdělení puklin pro populace 1–5 byly určeny pomocí lineární regrese a generování stochastických DFN modelů. Optimalizované parametry jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 Optimalizované parametry mocninného rozdělení pro populace 1–5

Pop	$a_{min}(x_{min})$ (m)	α (-)	P_{30}^a (1/m ³)	P_{32}^a (m ² /m ³)
1	0,254	3,111	0,837	1,234
2	0,327	3,387	0,571	0,719
3	0,198	3,135	1,45	1,229
4	0,237	2,682	0,115	0,903
5	0,629	4,841	0,058	0,096

^{a)} Hodnoty P_{30} a P_{32} jsou určeny pro čtvercové pukliny s mocninným rozdělením velikostí v intervalu $a \langle a_{min}, 1000 \rangle$ m; a je poloměr opsané kružnice.

S použitím optimalizovaných parametrů byl vygenerován stochastický sGeoDFN model zájmového bloku horninového masivu (verze k01). Model obsahuje čtvercové pukliny v populacích 1–5 s maximální délkou 1414 m. Středy puklin byly umístěny Poissonovým procesem. Model byl předán ve formátu .vtk včetně verifikačního a validačního protokolu.

6.2.2 Strukturně-geologický model – identifikace průběžných struktur na základě dat z vrtů a stěn chodeb

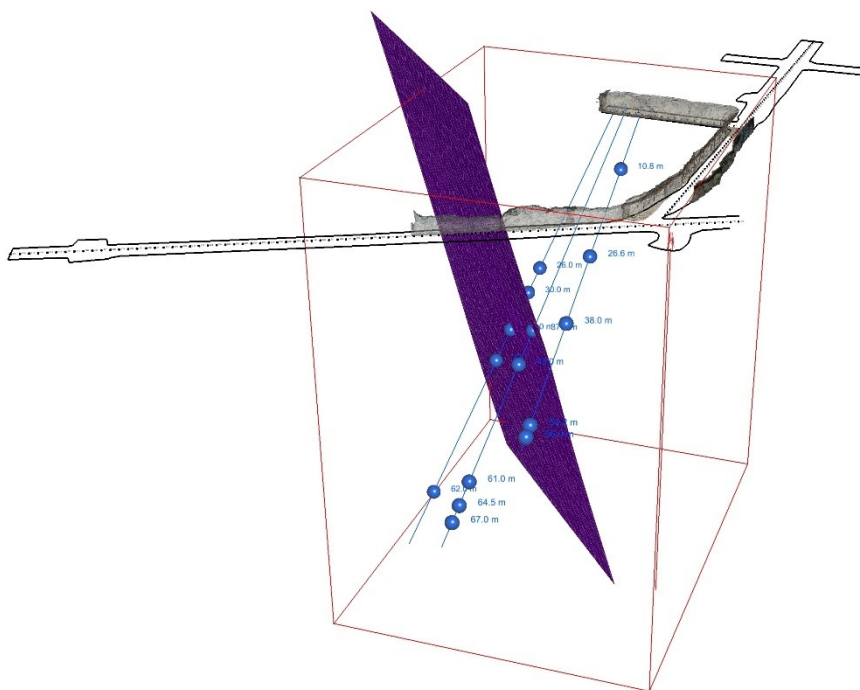
Tato kapitola se zabývá tvorbou strukturně-geologického modelu pro studovaný blok horninového masivu. Cílem je identifikovat a popsat průběžné struktury v horninovém masivu, které hrají klíčovou roli v jeho hydrogeologických vlastnostech.

Model je založen na datech z vrtů a stěn chodeb v bloku. Byly použity karotážní metody, včetně akustického televizoru (ABI40), k mapování puklin a tektonických poruch. Na základě těchto dat bylo definováno a vizualizováno 43 průběžných struktur.

Tvorba modelu zahrnovala následující kroky:

1. Identifikace struktur:

- V jednotlivých vrtech byla analyzována data z ABI40 a identifikovány struktury se stejnou/podobnou orientací a průběhem.
- Byly brány v úvahu pouze středně a velmi výrazné struktury, jakož i tektonické poruchy a zlomy (Obr. 27).
- Orientace a sklon struktur byly ověřeny pomocí dalších karotážních metod a primárních záznamů.



Obr. 27 Vizualizace deterministické struktury č.21 v 3D modelu, modré sféry reprezentují oblasti přítoků do vrtů určených karotáží

2. Konstrukce ploch:

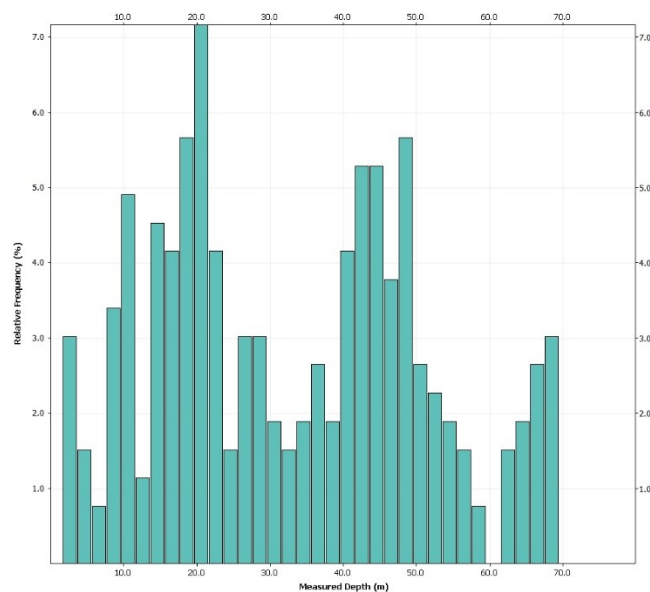
- Identifikované struktury v jednotlivých vrtech byly transformovány do linií.
- Pro každou strukturu byla vytvořena iniciální plocha ve formě meshe (triangulace).
- Plochy byly extrapolovány metodou extrapolace ve směru a sklonu okrajových trojúhelníků meshe.
- Pro zjednodušení a minimalizaci subjektivity modeláře byly plochy převzorkovány do gridu o rozměru buňky 2 × 2 metry.

3. Export dat:

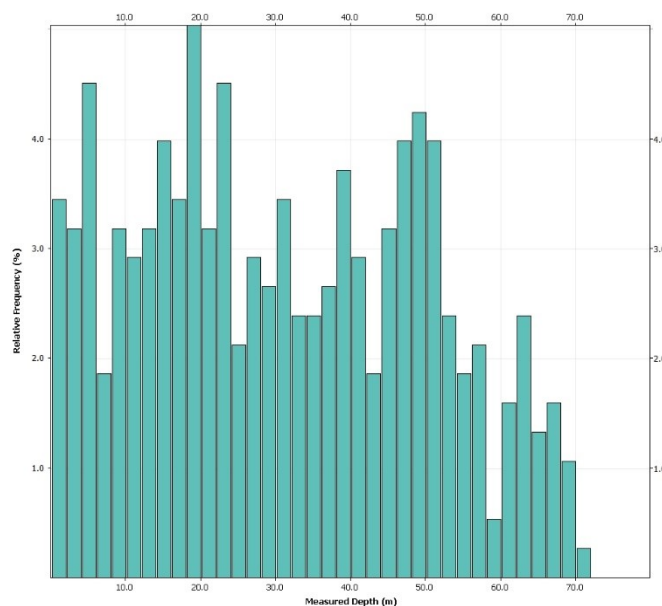
Data z modelu byla exportována pro tvorbu semi-deterministického GeoDFN modelu. Exportované soubory zahrnovaly souřadnice průsečíků struktur s vrty a chodbami, orientaci a sklon struktur, hloubku výskytu a populaci, do které daná struktura spadá.

Dále byla provedena korelace strukturních a karotážních měření in-situ se stochastickým GeoDFN modelem. DFN model byl vytvořen v programu DFraM a importovaný do software MOVE. Byly porovnány orientace a četnosti struktur v obou modelech.

Shoda DFN modelu s daty z karotážních měření je dobrá, avšak existují rozdíly v četnostech struktur (Obr. 28 a Obr. 29). Karotážní data ukazují vyšší četnost struktur, a to zejména v klastru foliací. Důvodem je, že akustická kamera zachycuje i drobné praskliny a pukliny, které nejsou relevantní pro hydrogeologické vlastnosti horninového masivu.



Obr. 28 Graf relativní četnosti struktur z karotáže po odfiltrování vyplněných a málo výrazných struktur (Relative Frequency) oproti hloubce vrtu (Measured Depth), celkově za vrty S27 až S36 s šířkou sloupců odpovídajících 2 m vrtu



Obr. 29 Graf relativní četnosti struktur z sGeoDFN modelu (Relative Frequency) oproti hloubce vrtu (Measured Depth), celkově za vrty S27 až S36 s šířkou sloupců odpovídajících 2 m vrtu

sGeoDFN model, který je založen na terénní dokumentaci stěn chodeb, ukazuje nižší četnost struktur. Je to z důvodu, že při geologické dokumentaci jsou zohledňovány pouze relevantní struktury a neberou se v úvahu pukliny či indukované praskliny s délkou menší než 20 cm.

Dále existují struktury, které jsou zachyceny pouze v karotážních datech a naopak. Je to způsobeno limity obou metod. Karotážní data jsou ovlivněna průměrem vrtu a nemožností určit délku a prostorovou návaznost struktur. Terénní dokumentace je zase omezena na dostupné odkryté úseky chodeb.

Pro optimalizaci modelu bylo nutné zvážit limity obou přístupů a zvolit vhodné metody filtrování dat. Je důležité zachovat relevantní struktury pro hydrogeologické vlastnosti horninového masivu a zároveň eliminovat drobné praskliny a struktury, které nemají vliv na průtok vody.

6.2.3 Semi-deterministický dGeoDFN model

Informace o průběžných (alias deterministických) strukturách, které byly vyhodnoceny z vrtů a stěn tunelů, jak je popsáno v předchozí kapitole, byly použity pro zpřesnění (conditioning - „podmínění“) GeoDFN modelu. Podmínění geometrického popisu struktur zaznamenanými průniky s vrtů a stěnami chodeb umožňuje v modelu deterministicky zohlednit existující pozorování, přičemž charakteristiky, které nelze přímo pozorovat (např. polohu středu nebo rozsah struktur), jsou i nadále modelovány stochasticky. Vzhledem k tomu, že výsledný model zahrnuje jak deterministické, tak stochastické prvky, je nazýván jako semi-deterministický GeoDFN model (dGeoDFN)

Postup tvorby dGeoDFN modelu:

1. Zpracování dat:

Z vrtů a stěn tunelů byly získány informace o průběžných strukturách (poloha, orientace, rozměry). Pro každou strukturu byl vytvořen základní geometrický model (plocha) reprezentující její tvar a rozsah. Data o průnicích struktur s vrtů a stěnami tunelů sloužila k definování podmínek pro generování dGeoDFN modelu.

2. Generování dGeoDFN modelu:

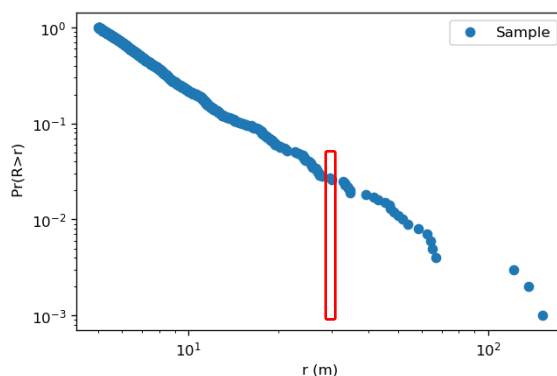
Navržený algoritmus generoval náhodné poloměry a středové body pro struktury na základě ploch základních geometrických modelů a s ohledem na pozorovaná data. Byly vytvořeny 2 realizace dGeoDFN modelu s minimálními poloměry 5 m a 10 m.

Vzhledem k tomu, že velikost struktur se řídí mocninným pravděpodobnostním rozdělením, které má obecně různé hodnoty parametrů pro každou geologickou puklinovou populaci, vnější cyklus algoritmu probíhá přes jednotlivé populace:

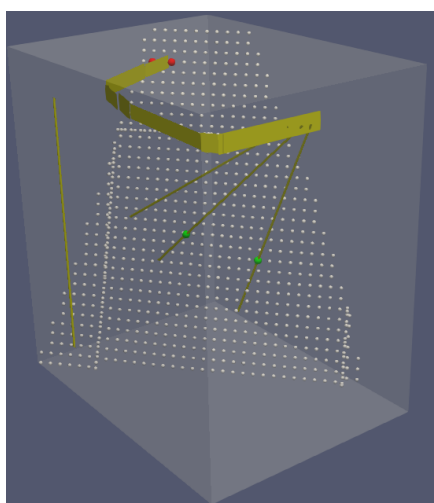
- 1) Cyklus přes jednotlivé populace: Pro danou puklinovou populaci se vygeneruje dostatečně velký vzorek náhodných hodnot poloměrů $\{r\}$ z mocninného rozdělení s příslušnými parametry r_{min} a α . Dosavadní zkušenosti ukazují, že vzorek o velikosti 1000 hodnot bývá dostačující (Obr. 30).
- 2) Vnitřní cyklus přes jednotlivé deterministické struktury dané populace:
 - a) Ze vzorku $\{r\}$ se náhodně vybere jedna hodnota r_i (Obr. 30).

- b) Pro zvolenou hodnotu r_i se hledají všechny potenciální středy puklin na ploše základního geometrického modelu struktury v rámci rozsahu modelové oblasti (Obr. 31 (a)), které jsou v souladu s pozorováním, tedy současně splňují podmínky:
- vzdálenost od všech bodů, kde NEBYLA struktura zaznamenána $r_{nr} > r_i$ (Obr. 31 (b)),
 - vzdálenost od všech bodů, kde BYLA struktura zaznamenána $r_r \leq r_i$ (Obr. 31 (c)).
- c) Pokud je výsledkem prázdná množina, zvolí se jiná hodnota r_i ze vzorku $\{r\}$ a opakují se operace od bodu 2) a). Pokud výsledkem není prázdná množina, pak:
- Vybraná hodnota r_i se uloží jako zvolený poloměr pro danou strukturu a tato hodnota se vyjme ze vzorku $\{r\}$ tak, aby nemohla být použita pro jinou strukturu dané populace.
 - Z množiny vyhledaných potenciálních středů se náhodně vybere jeden bod C_i (oranžově zobrazený bod na Obr. 31 (d)) a tento se uloží jako střed dané struktury.
 - Plocha základního geometrického modelu se ořízne kulovou plochou se středem C_i a poloměrem r_i . Tím je vytvořen finální geometrický model dané struktury (Obr. 31 (e)).
- d) Návrat do bodu 2).
- 3) Návrat do bodu 1).

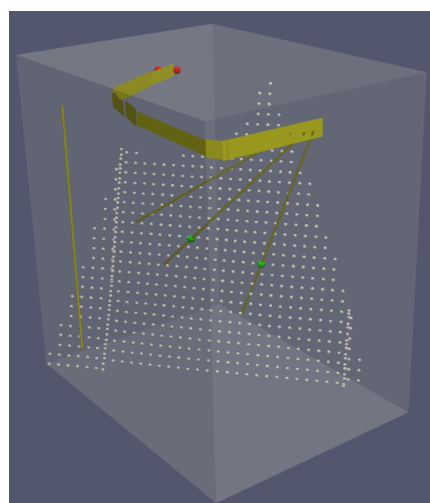
Uvedený algoritmus byl implementovaný v programovacím jazyce Python v programu dDFN_size_and_clip.py jako součást balíčku skriptů DFN_tools. Výstupem výpočtu je protokol zahrnující informace o průběhu výpočtu a základní charakteristiky vygenerovaných semi-deterministických struktur, soubor ve formátu csv s charakteristikami struktur a soubor ve formátu vtp, který obsahuje vlastní dGeoDFN model, tedy geometrické vyjádření jednotlivých struktur (typ PolyData).



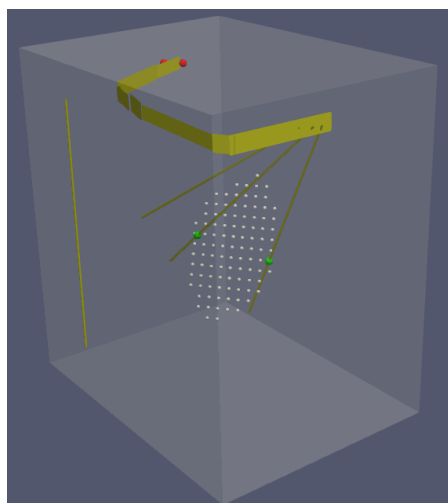
Obr. 30 Vzorek náhodných hodnot poloměrů $\{r\}$ z mocinného rozdělení. Červeně je vyznačena náhodně vybraná hodnota dle bodu 2) a)



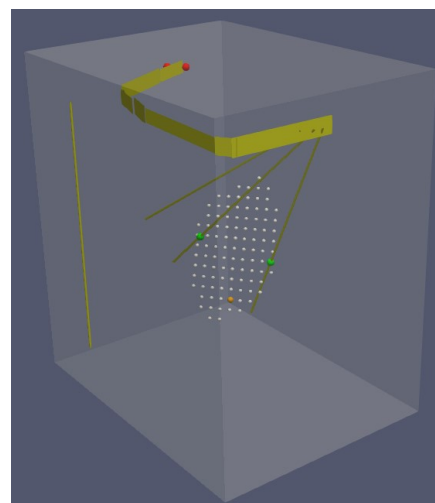
(a)



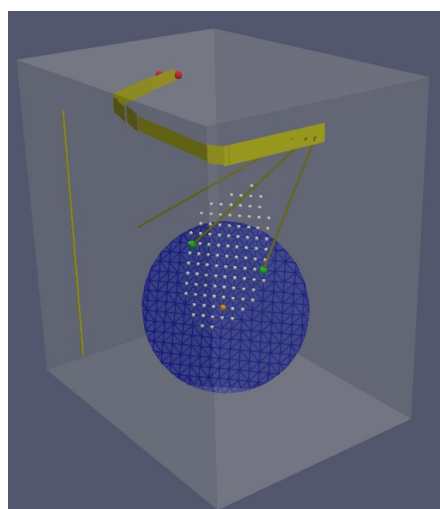
(b)



(c)



(d)



(e)

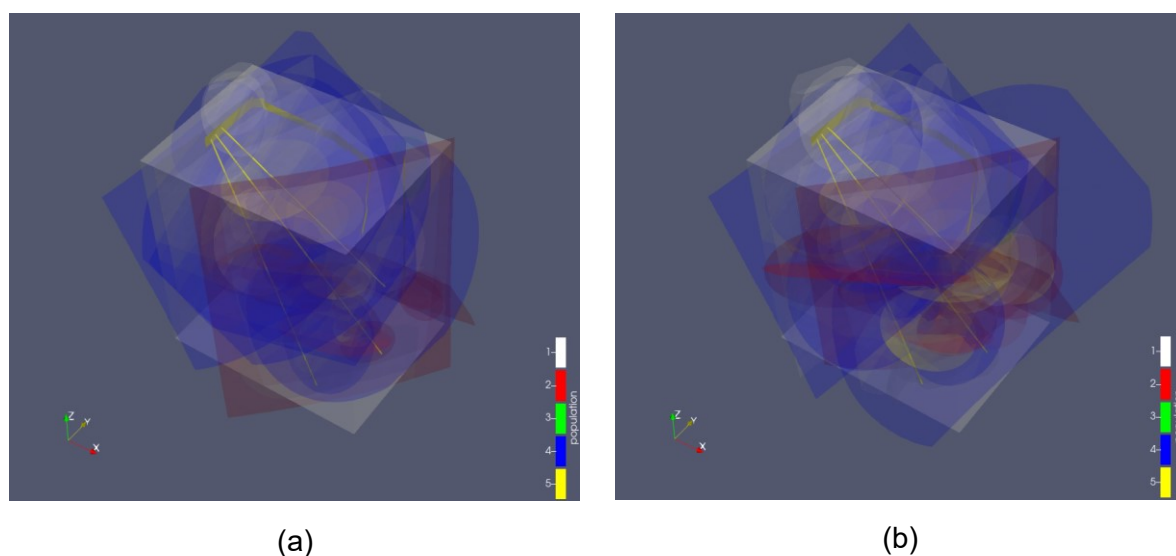
Obr. 31 Postupné generování semi-deterministického modelu průběžné struktury (pukliny)

3. Integrace sGeoDFN a dGeoDFN modelů:

Před dalším použitím vytvořených sGeoDFN a dGeoDFN modelů je třeba uvážit, že obě sítě popisují puklinový systém v částečně se překrývajících oblastech horninového masivu v okolí chodeb a vrtů, na kterých byla provedena strukturně-geologická měření. Konkrétně model sGeoDFN byl vygenerován pro oblast o rozměrech 130 m × 130 m × 100 m, zatímco dGeoDFN model pokrývá menší blok o rozměrech 60 m × 45 m × 65 m. Původní sGeoDFN zahrnuje všechny stochasticky generované pukliny, jejichž velikosti jsou zdola omezeny hodnotou parametru a_{min} (řádově desítky cm, viz Tab. 8), avšak shora prakticky omezeny nejsou. Semi-deterministický dGeoDFN model pak zahrnuje pukliny o velikosti větší, než je hodnota r_{min} , tedy 5 nebo 10 m. Je tedy evidentní, že oba modely obsahují duplicitní (ve statistickém smyslu) struktury. Před integrací obou sítí do výsledného GeoDFN modelu je proto třeba ze stochastického sGeoDFN modelu tyto duplicity odstranit.

Z sGeoDFN modelu byly odstraněny duplicitní struktury (větší než 5 m nebo 10 m), které se nacházely v oblasti pokryté dGeoDFN modelem.

Integrovaný model (Obr. 32) tak obsahoval jak stochastické struktury z sGeoDFN modelu (menší než 5 m nebo 10 m), tak deterministické struktury z dGeoDFN modelu (větší než 5 m nebo 10 m).



Obr. 32 3D vizualizace semi-deterministického dGeoDFN modelu verze d01s_v06 (a) $r_{min} = 5$ m, (b) $r_{min} = 10$ m

6.2.4 HydroDFN model

Práce na hydrogeologickém modelu zájmového území – HydroDFN modelu – byly v etapě zpracování základního numerického modelu realizovány ve dvou paralelních větvích, které se v některých dílčích bodech vzájemně překrývaly a doplňovaly:

- regionální HydroDFN model – zhruba o velikosti 1 × 1 × 1 km – cílem bylo vymezit tlakové a bilanční podmínky na hranici zájmového bloku horniny, provést analýzu vlivu některých vybraných parametrů puklinové sítě na výsledky modelu proudění, které bude možné aplikovat/využít v rámci následující etapy optimalizace detailního modelu,

- detailní HydroDFN model zájmového bloku horniny – o velikosti $130 \times 130 \times 100$ m – cílem bylo ověřit a připravit postupy pro sestavení geometrie puklinové sítě HydroDFN modelu na základě výstupů z GeoDFN modelování.

Po dokončení prací na základním geologickém GeoDFN modelu (stochastický a deterministický, viz kapitoly 6.2.1 až 6.2.3) byl připraven základní HydroDFN model a provedena úvodní kalibrace modelu a simulováno proudění. Následně byl proveden upscaling parametrů HydroDFN puklinové sítě do ECPM modelu, simulováno proudění a provedeno porovnání a zhodnocení výsledků.

Regionální HydroDFN model

Regionální HydroDFN model okolí PVP Bukov (pro potřeby projektu je regionální model zjednodušen, nejedná se o plnohodnotný model lokality) je podkladem a vstupem pro zpracování věrohodného detailního HydroDFN modelu zájmového bloku horniny. Základní funkcí tohoto regionálního modelu je vymezení tlakových a bilančních (velikost přítoku) podmínek na okrajích vymezeného bloku horniny, který je v rámci projektu zkoumán a zpracován detailněji. Regionální model zahrnuje oblast dolu Rožná zhruba do vzdálenosti 500 m od PVP Bukov, viz Obr. 22.

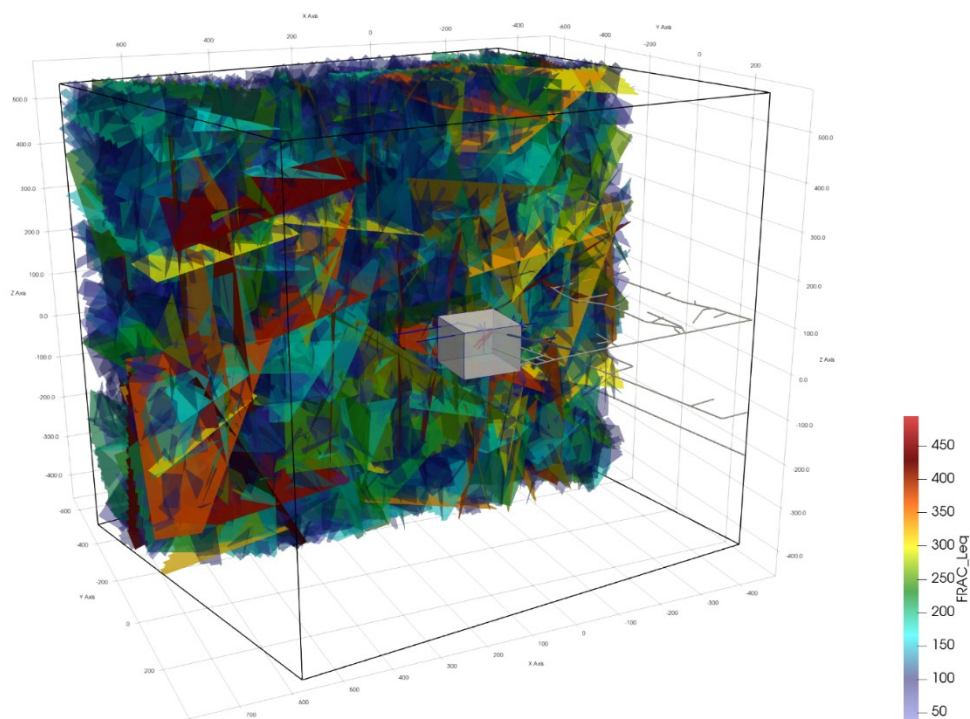
V regionálním modelu jsou rovněž zahrnuty nově realizované vrty S-27, S-31 a S-36 – jsou zadány s jedním zapakrovaným intervalem (s pakrem na ústí vrtu), tzn. nejsou okrajovou podmínkou, ale hydraulicky propojují pukliny protínající vrt. Toto zadání bylo využito pro analýzu, porovnání a vyhodnocení tlakových poměrů při variantních simulacích a základní kalibraci modelu. Regionální HydroDFN model je kompletně zpracován v programu ConnectFlow, tj. včetně generování puklinové sítě – na rozdíl od detailního HydroDFN modelu, kde je tvorba vstupní geometrie sítě puklin realizována v programech MOVE (deterministická síť) a DFraM (stochastická síť). Vstupní geometrické parametry pro generování puklinové sítě v základním modelu byly převzaty z předchozích prací na zakázkovém listu „T8 – Transport radionuklidů z hlubinného úložiště/Testování koncepčních a výpočetních modelů“ (Gvoždík et al. 2020), postup generování HydroDFN puklinové sítě byl ale modifikován:

- vzhledem k regionálnímu měřítku modelu (velikost $1100 \times 900 \times 1000$ m) byly generovány řádově větší pukliny, tj. o velikosti 50×50 až 500×500 m,
- vstupní statistické parametry pro generování puklin zůstaly zachovány – 9 populací puklin, parametry Fisherova rozdělení pro směry (orientace) puklin, parametry mocninného rozdělení pro velikost a počet puklin – exponent mocninného rozdělení zůstává stejný, parametr P_{32} je přepočten pro nový rozsah velikosti puklin,
- byla provedena optimalizace počtu puklin na počet průsečíků ve vrtech a v rozrážkách (dle realizovaných VTZ a karotážních měření je počet vodivých puklin nebo vodivých zón ve vrtech (4–6), dokumentovaných přítoků z puklin/zón v rozrážkách PVP Bukov je přibližně 30). Optimalizované vstupní parametry pro generování stochastických puklin v regionálním HydroDFN jsou uvedeny v Tab. 9. V závislosti na realizaci sítě (bylo generováno 10 různých stochastických sítí) je průměrný počet průsečíků puklin s vrty 1–5 a počet průsečíků puklin s chodbami PVP Bukov 20–50.

Tab. 9 Optimalizované vstupní parametry pro generování stochastických puklin v regionálním HydroDFN modelu

Population	Fisher distribution			Power law distribution			
	Strike (°)	Dip (°)	κ (-)	α (-)	L_1 (m)	L_2 (m)	$P_{32}[L_1, L_2]$ (m ² ·m ⁻³)
1	222,9	85,4	35,1	3,328	50	500	0,01892
2	49,6	36,9	2,7	3,062	50	500	0,02633
3	313,7	3,4	28,6	3,8	50	500	0,00056
4	316,8	87,5	25,4	3,789	50	500	0,00032
5	133,4	62,3	2,9	3,382	50	500	0,00259
6	346,3	88,6	18,7	3,042	50	500	0,01184
7	1,0	78,2	3,8	3,001	50	500	0,00745
8	269,5	88,6	17,3	3,607	50	500	0,00151
9	86,0	83,3	4,0	3,296	50	500	0,00646

Regionální HydroDFN model obsahuje přibližně 7100 puklin dělených do 120 000 subpuklin, mezi subpuklinami je zhruba 370 000 průsečíků. Řez vygenerovaným regionálním HydroDFN modelem je v Obr. 33.



Obr. 33 Řez regionálním HydroDFN modelem (barevně je odlišena velikost generovaných puklin $Frac_{Leq}$) – severní pohled, zobrazena je také oblast detailního modelu, vrty v PVP Bukov a důlní chodby (vizualizace v ParaView)

Regionální model proudění podzemní vody byl realizován ve 12 variantách, ve kterých byl analyzován a hodnocen vliv vybraných parametrů na výsledky modelu, přehled modelových variant je uveden v Tab. 10.

Tab. 10 Přehled modelových variant regionálního modelu s hodnotami testovaných parametrů

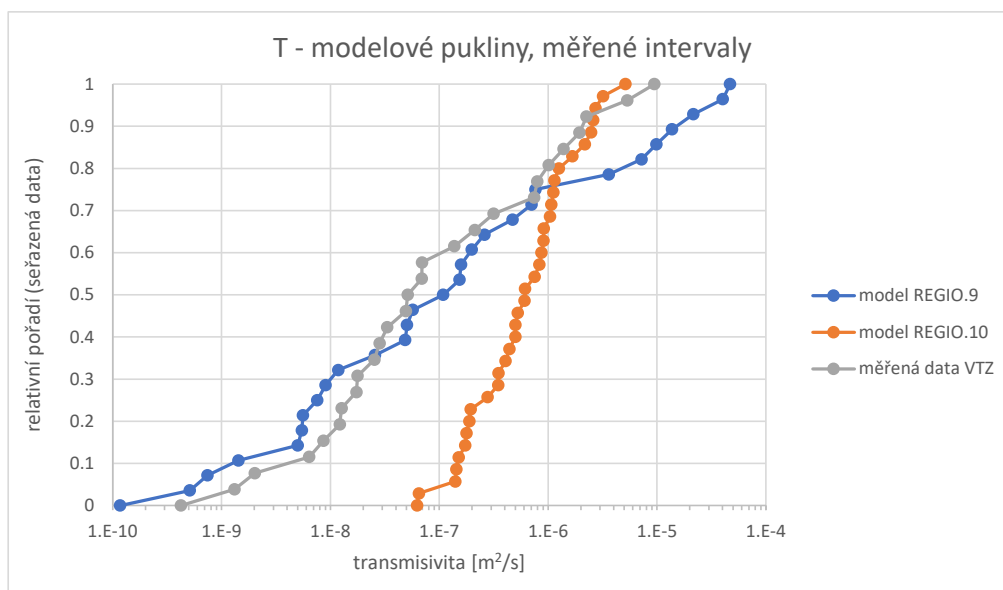
Modelová varianta	L_1 [m]	L_2 [m]	$P_{32}(L_1, L_2)$	$\sigma_{ln(T)}$	Poznámka
Regio.0	50	500	P32	0.0	korelovaná transmisivita puklin
Regio.1	50	500	P32	3.0	semi-korelovaná transmisivita puklin
Regio.2	50	500	$1.2 \times P32$	3.0	
Regio.3	50	500	$1.5 \times P32$	3.0	
Regio.4	50	500	$1.2 \times P32$	3.5	
Regio.5	20	500	$1.2 \times P32$	3.5	nižší L_1
Regio.6	10	500	P32*	3.5	nižší L_1 , P32 bez přepočtu
Regio.7	50	500	P32	1.0	
Regio.8(1*)	50	500	P32	3.0	Regio.1 bez zadaných spodních pater 16 a 18
Regio.9(6*)	10	500	P32*	3.5	Regio.6 s kalibrací Q - zvýšení rozevření
Regio.10(7*)	50	500	P32	1.0	Regio.7 s kalibrací Q - zvýšení rozevření
Regio.11(6**)	10	500	P32*	0.0	Regio.6 s korelovanou transmisivitou

Numerický výpočet proudění podzemní vody je v programu ConnectFlow realizován jako oddělený samostatný proces, kde vstupem je generovaný geometrický model, včetně okrajových podmínek. Výpočet proudění v základní modelové variantě „Regio.0“ na jedné realizaci puklinové sítě trvá 6–7 minut. Vyšší variabilita transmisivity puklin a vyšší počet puklin a průsečíků výpočet prodlužují – ve variantě „Regio.5“ je doba výpočtu 18–22 minut.

Hodnocení výsledků regionálního modelu bylo zaměřeno na:

- analýzu a porovnání tlakových poměrů v nově realizovaných vrtech (měřené hodnoty přetlaku ve vrtech zapakrovaných na ústí jsou v rozsahu 5–10 m, tj. měřená tlaková výška 27–32 m při geodetické výšce ústí vrtu 22 m,
- analýzu a porovnání velikosti přítoků do PVP Bukov (dle operativních dat monitoringu je měřený celkový přítok do PVP Bukov přibližně 3,3 l/s).

Měřeným datům nejlépe odpovídají varianty Regio.9 a 10, u kterých byly vyhodnoceny také transmisivity modelových puklin protínající vrty S-8, S-27, S-31 a S-36. U varianty Regio.9, kde byly vypočteny přítoky do PVP Bukov v rozsahu 1,1 až 14,0 l/s, byly do hodnocení zahrnuty pouze pukliny z 5 vybraných realizací sítí s přítoky 2,5 až 5,7 l/s (29 ze 49 puklin). U varianty Regio.10 s vypočtenými přítoky v rozsahu 2,1 až 4,4 l/s byly zahrnuty pukliny ze všech realizací (36 puklin). Modelové transmisivity puklin jsou vykresleny v grafu v Obr. 34 a porovnány s měřenými hodnotami transmisivity z realizovaných VTZ na úsecích vrtů (27 měřených hodnot). Z průběhu křivek je patrný významně nižší rozptyl hodnot u varianty Regio.10, který souvisí s nižší náhodnou variabilitou transmisivit (zadána odchylka $\sigma_{ln(T)} = 1,0$). Naopak vyšší zadaná variabilita a vyšší rozptyl hodnot u varianty Regio.9 velmi dobře koreluje s výsledky VTZ.



Obr. 34 Modelové transmisivity puklin protínající vrty S-8, S-27, S-31 a S-36 v kalibrovaných variantách Regio.9 a 10 a měřené transmisivity v úsecích vrťů vyhodnocených z VTZ

HydroDFN modelu bloku horniny

Práce na základním detailním HydroDFN modelu bloku horniny byly zaměřeny na import a implementaci dat z GeoDFN modelu, na fázi generování geometrického modelu a na efektivní vymezení okrajových podmínek na hranici modelového bloku.

Geometrie puklinové sítě GeoDFN modelu je základním vstupem pro vytvoření HydroDFN modelu a model proudění a transportu je pak realizován na modifikovaném geologickém modelu, upraveném pro potřeby hydrogeologického modelování:

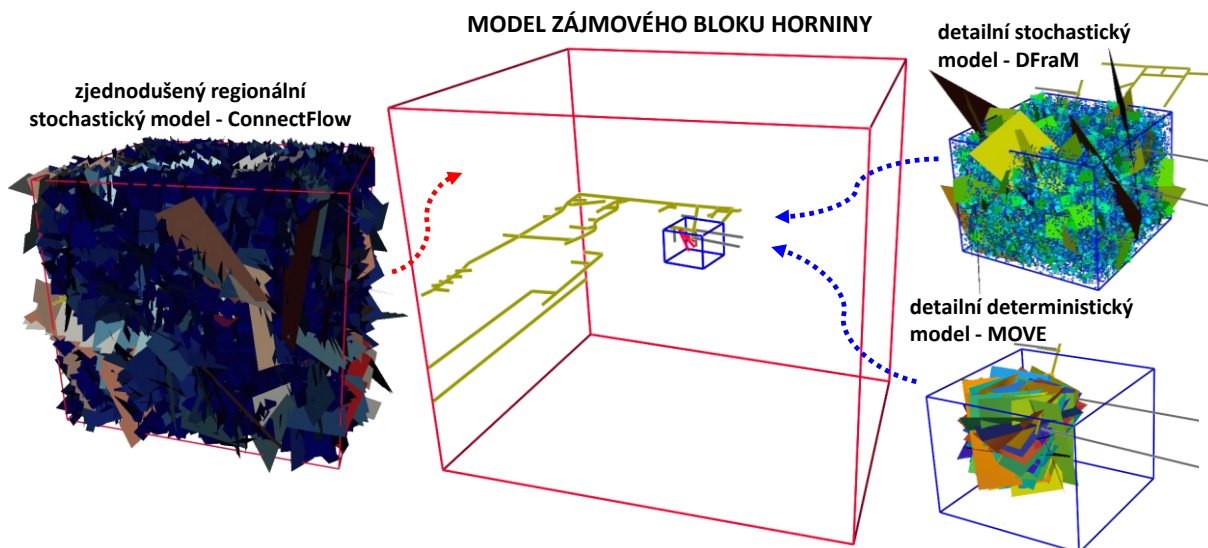
- 1) stochastický sGeoDFN model generovaný v programu DFraM – pro HydroDFN model je geometrie puklin dodána ve VTK formátu (umožňuje přímou vizualizaci v ParaView a je vhodný pro další zpracování – obsahuje jak geometrii, tak parametry puklin), z VTK souboru je geometrie puklin převedena pomocí připraveného skriptu do podoby IFZ souboru (speciální textový formát pro import/export puklin, který dále vstupuje do výpočtu v ConnectFlow),
- 2) deterministický dGeoDFN model vytvořený v programu MOVE, respektive dále zpřesněný (podmíněný) semi-deterministický dGeoDFN model – pro HydroDFN model je geometrie puklin dodána v DXF formátu (přímý export deterministického modelu v MOVE) nebo VTK formátu (zpracovaný semi-deterministický model). Ze souborů DXF nebo VTK je geometrie puklin převedena pomocí připraveného postupu do podoby IFZ souboru, který vstupuje do simulací v ConnectFlow.

V rámci přípravy koncepčního HydroDFN modelu bylo navrženo zadání okrajových podmínek na hranicích detailního modelu bloku horniny z výpočtu modelu proudění v regionálním měřítku. Realizované výpočty regionálního modelu poukázaly na poměrně velký rozptyl hodnot tlaků v zadaných vrtech i velikosti přítoků do důlního díla. Současně časové nároky na výpočet regionálního modelu jsou relativně malé (minuty až první desítky minut v závislosti na hustotě puklinové sítě). Z těchto důvodů byl částečně modifikován koncept definování okrajových

podmínek na hranici detailního modelu. Původní koncept předpokládal postup složený ze dvou na sebe navazujících kroků:

- 1) výpočet proudění v regionálním HydroDFN modelu ($1,1 \times 0,9 \times 1,0$ km) a vyhodnocení tlakových poměrů v průsečících „regionálních“ puklin s plochami vymezujícími oblast detailního modelu ($130 \times 130 \times 100$ m),
- 2) zadání získaných hodnot tlaku z regionálního modelu jako okrajové podmínky v detailním HydroDFN modelu a realizace výpočtů v doméně detailního modelu.

Upravená koncepce HydroDFN modelování (viz Obr. 35), která byla aplikována při sestavení základního modelu a která byla použita při řešení v navazujících etapách, je komplexnější a z pohledu „předávání“ tlakových/bilančních podmínek mezi regionálním a detailním modelem efektivnější. Model kombinuje regionální i detailní měřítko úlohy – ve společném modelu je zadána vnitřní detailní doména ($130 \times 130 \times 100$ m), kterou obklopuje vnější regionální doména ($1,1 \times 0,9 \times 1,0$ km).



Obr. 35 Základní HydroDFN model zájmového bloku horniny v programu ConnectFlow – stochastická puklinová síť ve vnější regionální modelové doméně (z programu ConnectFlow), detailní deterministická puklinová síť (z programu MOVE) a doplňující stochastická síť (z programu DFraM) ve vnitřní detailní doméně

Stochastický sHydroDFN model

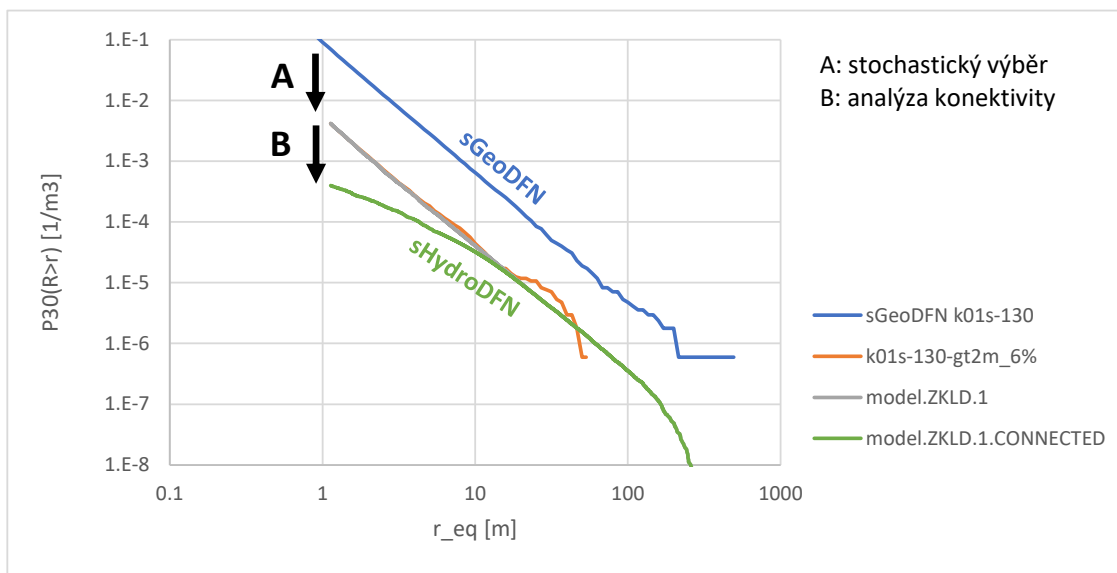
Pro generování geometrie puklinové sítě základního modelu byly použity aktualizované optimalizované parametry mocninného rozdělení pro populace 1–5 uvedené v Tab. 8 (parametry mocninného rozdělení pro počet puklin). Tyto parametry byly použity pro generování stochastických puklin v regionální i detailní doméně sHydroDFN modelu. Rozdíl je v generované velikosti puklin v jednotlivých doménách:

- ve vnitřní detailní doméně a studované oblasti masivu jsou generovány pukliny s minimální plochou 4 m^2 , tj. čtvercové pukliny $2 \times 2 \text{ m}$ a větší,

- ve vnější doméně jsou generovány pukliny s minimální plochou 2500 m², tj. čtvercové pukliny 50 × 50 m a větší (simulovány byly také varianty s minimální velikostí puklin 10 × 10 m a 30 × 30 m).

Ve fázi přípravy geometrie hydrogeologického sHydroDFN modelu jsou nejdříve odstraněny nevodivé (uzavřené) pukliny z geologického sGeoDFN modelu. Tento proces redukce počtu puklin (viz Obr. 36) se skládá ze dvou na sebe navazujících kroků:

- náhodný výběr zvoleného podílu puklin ze vstupního sGeoDFN, respektive je použit výpočetně efektivnější způsob, kdy jsou nejdříve o zvolený podíl sníženy parametry P30 populací puklin a následně generován nový, již redukovaný vstupní stochastický sDFN model,
- analýzou konektivity generované sítě jsou odstraněny nekonektivní izolované pukliny a klastry puklin, které se nepodílí na proudění. Tento krok je realizován v rámci generování modelu v programu ConnectFlow.



Obr. 36 Proces redukce počtu puklin při přípravě HydroDFN modelu, porovnání velikosti a hustoty puklin generovaných v programech DFraM a ConnectFlow (parametr P_{30})

Na základě analýzy variantních realizací puklinové sítě (generování a vyhodnocení geometrického DFN modelu) byly připraveny vybrané varianty základního sHydroDFN modelu a byla provedena simulace proudění. Přehled variant je uveden v Tab. 11.

Numerický výpočet proudění podzemní vody a analýza výsledků modelů byly realizovány stejným postupem jako v případě simulací regionálního HydroDFN modelu. Modelové varianty byly simulovány na 10, respektive 20, realizacích sítě. Výpočet proudění na jedné realizaci puklinové sítě trvá 3–10 minut.

Tab. 11 Přehled modelových variant základního sHydroDFN modelu

Model	Doména	$L_{\min}$ (m)	$L_{\max}$ (m)	$r_{\min}$ (m)	$r_{\max}$ (m)	podíl puklin v konektivním HydroDFN	počet realizací
ZKLD.0	reg+det	10,0	500,0	5,64	282,1	6 %	10
ZKLD.1	regio	10,0	500,0	5,64	282,1	6 %	10
	detail	2,0	500,0	1,13	282,1		
ZKLD.2	regio	30,0	500,0	16,93	282,1	6 %	20
	detail	2,0	500,0	1,13	282,1		
ZKLD.3	regio	50,0	500,0	28,21	282,1	6 %	20
	detail	2,0	500,0	1,13	282,1		
ZKLD.4	regio	50,0	500,0	28,21	282,1	3 %	10
	detail	2,0	500,0	1,13	282,1	15 %	
ZKLD.5	regio	50,0	500,0	28,21	282,1	8,5 %	10
	detail	2,0	500,0	1,13	282,1		

Hodnocení výsledků modelu bylo zaměřeno na:

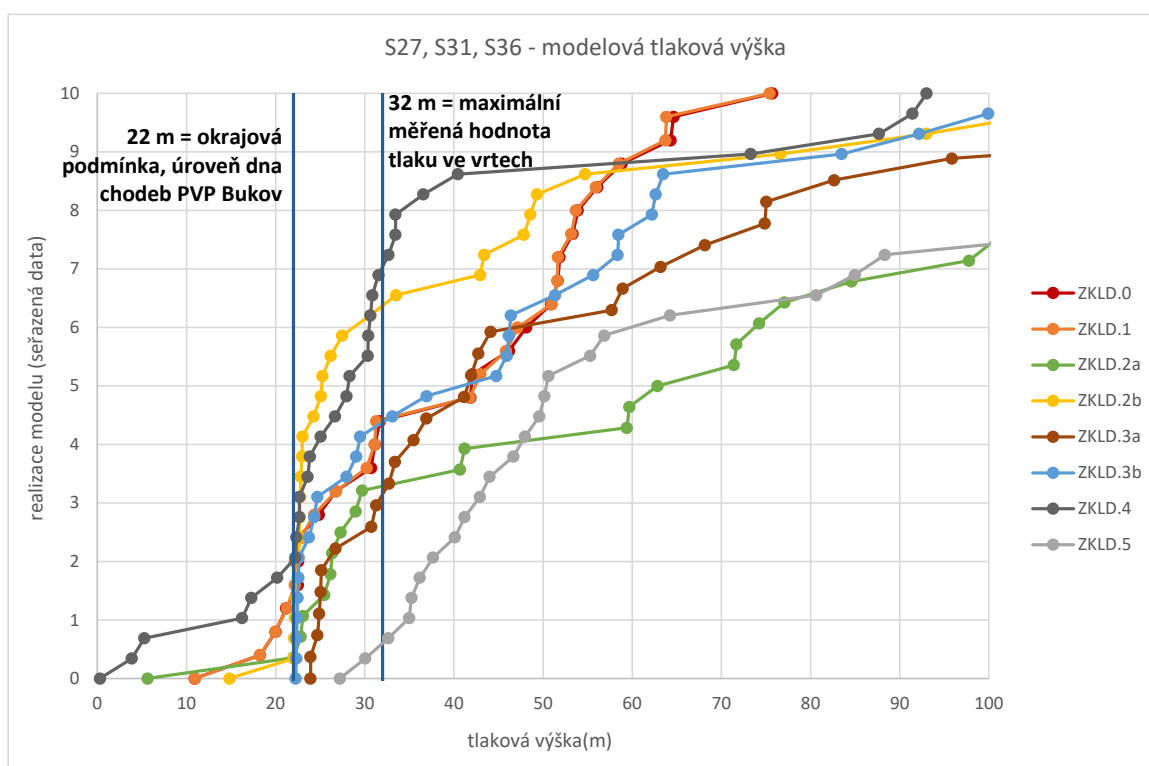
- analýzu a porovnání tlakových poměrů v nově realizovaných vrtech (měřené hodnoty přetlaku ve vrtech zapakrovaných na ústí jsou v rozsahu 5–10 m, tj. měřená tlaková výška 27–32 m při geodetické výšce ústí vrtu 22 m) – byly zpracovány vypočtené tlakové výšky v zapakrovaných intervalech vrtů S-27, S-31 a S-36 pro jednotlivé modelové varianty a realizace puklinové sítě, viz přehled průměrných modelových hodnot tlaků v Tab. 12, kompletní sada vypočtených hodnot je uvedena v Obr. 37,
- analýzu a porovnání velikosti přítoků do PVP Bukov (dle operativních dat monitoringu je měřený celkový přítok do PVP Bukov přibližně 3,3 l/s) – byly zpracovány vypočtené výtoky z puklin protínající vrtů a chodby důlního díla pro jednotlivé modelové varianty a realizace puklinové sítě.

Průměrný měřený přetlak ve vrtech S-27, S-31 a S-36 (při zapakrování pouze na ústí) je v rozsahu 5–10 m. Při zadané geodetické výšce vrtů 22 m je tedy měřená tlaková výška ve vrtech 27–32 m, za „optimální“ modelové hodnoty byly považovány tlaky v rozsahu 24–35 m. Při porovnání s modelovými výsledky (Tab. 12) odpovídá nejlépe těmto hodnotám varianta ZKLD.4 s 5 vhodnými realizacemi sítě.

Tab. 12 Průměrné modelové tlakové výšky v zapakrovaných intervalech vrtů S-27, S-31 a S-36 pro jednotlivé modelové varianty a realizace puklinové sítě (hodnoty ve sloupcích, tj. modelových variantách, jsou seřazeny; barevná škála – dle měření tlaku v zapakrovaných vrtech jsou optimální hodnoty přibližně do 2–13 m přetlaku na ústí vrtu, tj. do tlakové výšky 24–35 m)

Pořadí	ZKLD.0	ZKLD.1	ZKLD.2a	ZKLD.2b	ZKLD.3a	ZKLD.3b	ZKLD.4	ZKLD.5
1	19.8	19.8	22.6	21.5	23.9	22.4	3.1	31.2
2	20.8	20.2	26.0	22.5	25.0	22.4	17.9	37.6
3	22.5	22.9	28.7	22.7	31.1	24.3	22.6	41.6
4	31.2	30.9	29.2	25.5	33.9	28.8	26.4	45.5
5	46.6	46.4	59.5	25.9	35.4	38.8	28.5	46.2
6	47.8	47.8	74.8	26.4	40.3	49.6	30.5	51.1
7	53.6	53.5	87.1	40.3	63.0	51.5	31.3	76.6
8	62.6	62.0	90.1	46.6	66.9	58.5	33.6	107.4
9	63.7	63.5	135.9	49.0	84.5	72.7	66.6	129.1
10	#N	#N	136.8	106.9	177.8	84.8	67.7	187.7

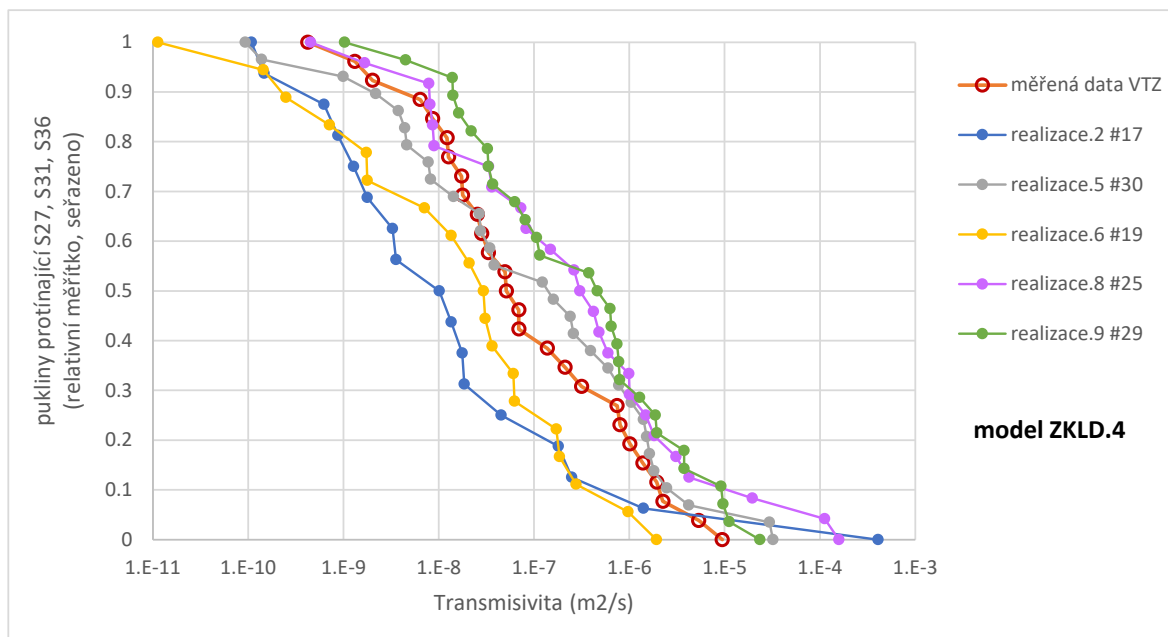
průměrný tlak S-27, S-31, S-36 24–35 m



Obr. 37 Modelové tlakové výšky ve vrtech S-27, S-31 a S-36 pro jednotlivé modelové varianty ZAKLD.X – v rámci varianty jsou vypočtené hodnoty pro všechny 3 vrty a všech 10 realizací sítě (tj. 30 hodnot) seřazeny a vyneseny do grafu

Pro 5 „optimálních“ realizací puklinové sítě modelu ZKLD.4 byly připraveny kalibrované modely s přítokem do prostoru PVP Bukov 3,3 l/s a vyhodnoceny transmisivity modelových puklin protínající vrty S-27, S-31 a S-36. Modelové transmisivity puklin jsou vykresleny v grafu v Obr. 38 a porovnány s měřenými hodnotami transmisivity z realizovaných VTZ na úsecích vrtů (27

měřených hodnot). Všechny křivky mají velmi podobný sklon, je ale patrný poměrně velký rozdíl hodnot mezi jednotlivými realizacemi (horizontální posun křivek) – až téměř dva řády mezi realizací č. 2 a realizacemi č. 8 a 9. Nejlépe odpovídá měřeným datům z VTZ realizace č. 5 – tato stochastická realizace sHydroDFN modelu ZKLD.4.r5 (sít' „kalibrovaná“ na měřené hodnoty tlaku ve vrtech, přítoky do PVP Bukov a měřené transmissivity z VTZ) byla dále použita při realizaci deterministického dHydroDFN a při upscalingu do HydroECPM.



Obr. 38 Modelové transmissivity puklin protínajících vrtů S-8, S-27, S-31 a S-36 v kalibrovaných realizacích modelové varianty ZKLD.4 a měřené transmissivity v úsecích vrtů vyhodnocených z VTZ

Semi-deterministický dHydroDFN model

Semi-deterministický dHydroDFN model je z hlediska velikosti modelové domény a zadaných okrajových podmínek stejný jako výše popsany stochastický sHydroDFN model. Označení „semi-deterministický“ dHydroDFN odkazuje na vstupní semi-deterministický dGeoDFN model, který geometricky zpřesňuje propojení puklinové sítě v zájmové oblasti v prostoru nově realizovaných vrtů a vrtu S-8. Semi-deterministický dHydroDFN model je kombinovaný stochasticko-deterministický model, kde puklinovou síť tvoří dva vstupy:

- 1) základní stochastický sHydroDFN model popsany výše (realizace ZKLD.4.r5), tj. vstupem je geometrie puklinové sítě včetně základní verze kalibrované transmissivity puklin,
- 2) semi-deterministický dGeoDFN model (verze d01s_v06.rmin05, viz kapitola 6.2.3). Pro jednotlivé pukliny (mesh) jsou současně náhodně vygenerovány transmissivity podle stejného pravidla jako u stochastických puklin, tj. je použit semi-korelovaný vztah s funkční závislostí na velikosti struktury (ekvivalentní poloměr) a s log-normálním rozdělením, v základním modelu je pro celou strukturu vypočtena jedna hodnota transmissivity.

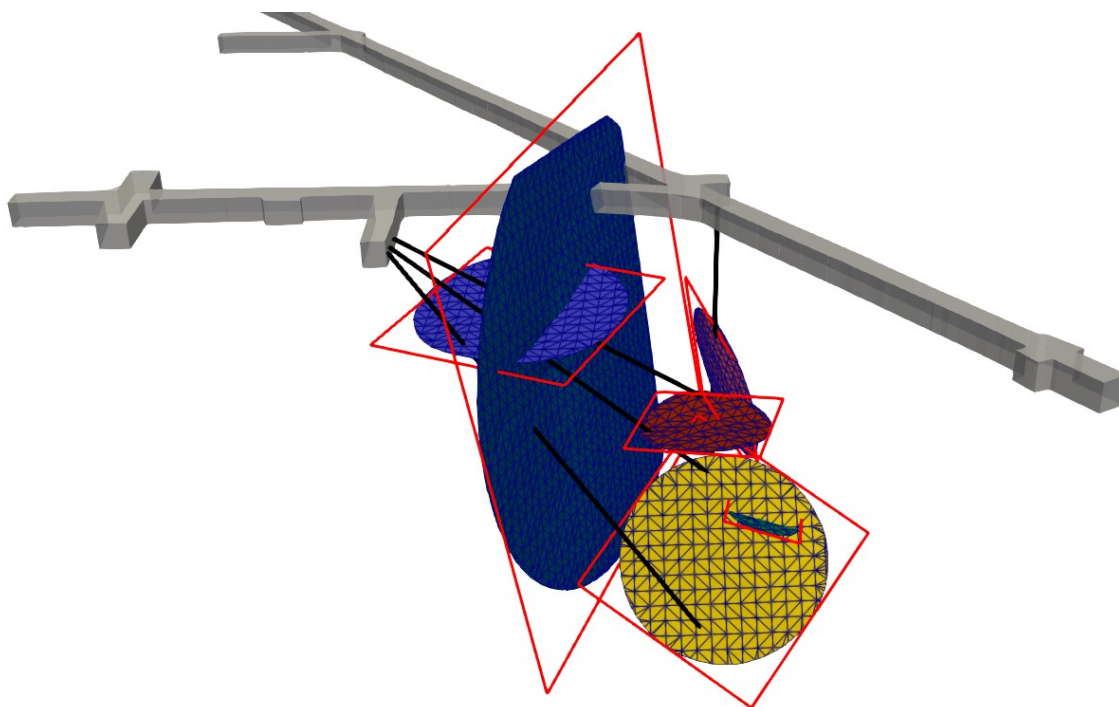
Aby v modelu nedošlo k duplicitě puklin protínajících vrtů S-27, S-31, S-36 a S-8, jsou ze stochastického sHydroDFN modelu odstraněny všechny náhodně generované pukliny protínající tyto vrtů – předpokladem pro tento postup je, že připravený semi-deterministický dGeoDFN

obsahuje všechny hydrogeologicky významné pukliny, které protínají tyto vrty. Odstranění „duplicitních“ stochastických puklin je realizováno v ConnectFlow, který má pro tento účel implementovány vlastní funkce (příkazy).

Na připraveném semi-deterministickém dHydroDFN modelu byl opět proveden výpočet proudění, analyzovány výstupy a porovnány s výsledky stochastického sHydroDFN. Z hlediska modelové bilance byl celkový přítok do PVP Bukov v semi-deterministickém modelu v podstatě totožný s přítokem ve stochastickém modelu. Je to dáno malým lokálním dosahem puklinové sítě semi-deterministického modelu v rámci PVP Bukov, minimálním počtem průsečíků s chodbami a celkově tedy minimálním ovlivněním.

Z hlediska tlakových poměrů ve vrtech ale dochází k jejich výraznému ovlivnění – větší počet puklin v semi-deterministickém modelu a celkově lepší propojení puklinové sítě vede ke snížení modelových tlaků ve vrtech téměř na úroveň okrajové podmínky zadané v chodbách (22 m). Modelový přetlak ve vrtech je v závislosti na generované transmisivitě pouze 0,5–1,0 m (ve stochastickém sHydroDFN.ZKLD4.r5 je vypočtený průměrný přetlak 4,5 m).

V další fázi zpracování a optimalizace HydroDFN modelu pro simulaci realizovaných a navrhovaných testů byl mírně upraven postup generování sítě – pukliny byly zjednodušeny na čtvercové pukliny s deterministicky zadaným průměrným sklonem a směrem, což umožňuje lépe diskretizovat pukliny do výpočetní sítě a efektivněji zadávat variabilní parametry na puklině při kalibraci modelu.



Obr. 39 Upravený koncept přípravy geometrie dHydroDFN v ConnectFlow – generování ekvivalentních čtvercových deterministických puklin – ukázka pro vybrané mesh 12 až 17

6.2.5 HydroECPM model

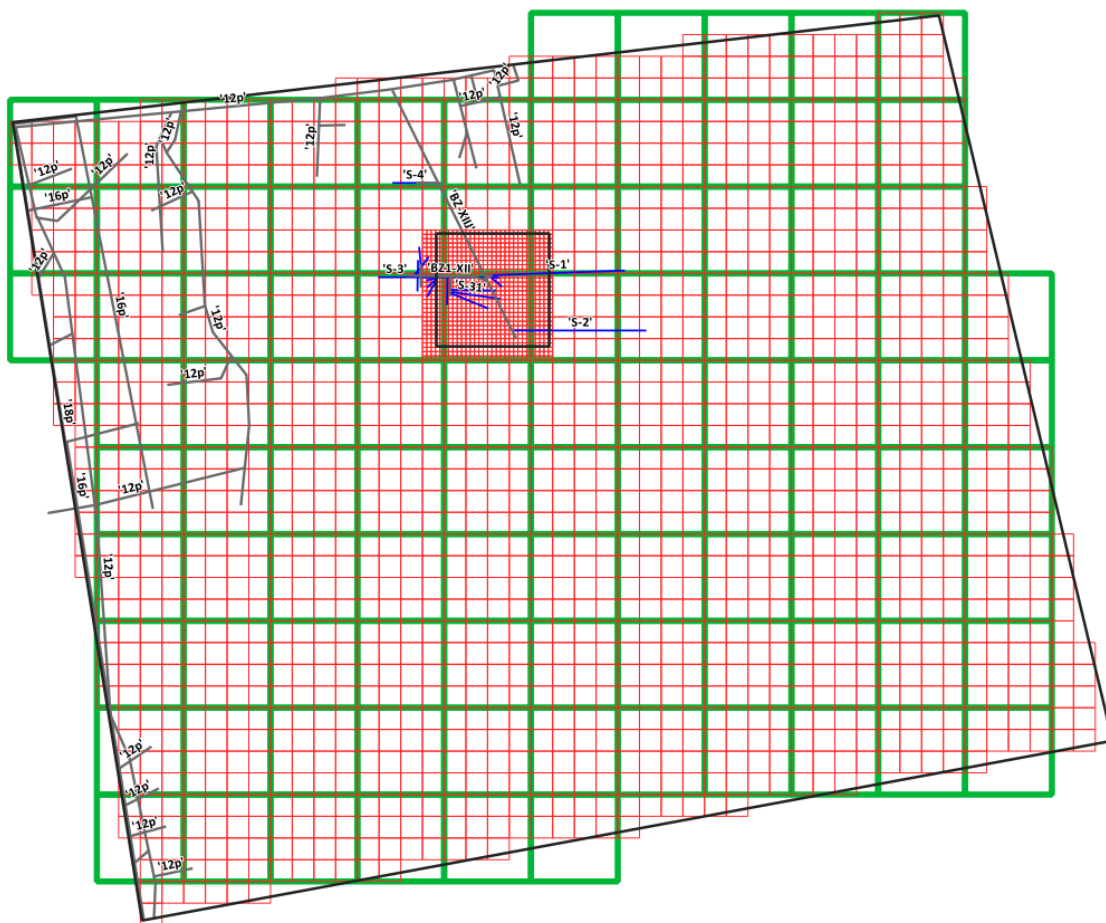
HydroECPM model, tj. hydrogeologický model ekvivalentního porézního kontinua, je obecně realizován ve třech krocích:

- 1) nejdříve je zvolená oblast modelu rozdělena do spojitě 3D sítě výpočetních buněk (např. tvaru krychle), ve kterých má být simulace realizována ECPM konceptem a pro které mají být stanoveny ekvivalentní hydraulické parametry. Volba ECPM oblasti a její diskretizace je poměrně důležitý krok a souvisí s prvotní otázkou: „Co je cílem ECPM simulace, za jakým účelem je celkové zjednodušení modelu realizováno?“
- 2) v druhém kroku je hydrogeologická puklinová síť (HydroDFN) převedena pomocí tzv. upscalingu do definované sítě buněk. K tomuto účelu má program ConnectFlow k dispozici funkci, která si pro jednotlivé buňky kontinua „vyřízne“ z HydroDFN příslušnou část puklinové sítě (pro přesnější stanovení parametrů je vhodné definovat určitý přesah, „buffer“), provede v jednotlivých směrech x , y , z simulaci proudění a převede puklinovou síť v dané buňce (propojení a transmisivitu puklin) na ekvivalentní hodnotu tenzoru hydraulické vodivosti dané buňky (dále je vypočtena pórovitost buňky),
- 3) posledním třetím krokem je klasický postup při sestavení a realizaci modelu, tj. zadání okrajových podmínek a provedení simulace. Program ConnectFlow má vlastní modul pro simulaci modelu založeného na koncepci CPM, který byl použit při řešení (případně lze použít libovolný software, který dokáže pracovat s připravenou 3D sítí buněk a vypočtenými ekvivalentními parametry, např. MODFLOW-USG).

Hlavní benefit ECPM konceptu, tj. zjednodušení komplexní puklinové sítě DFN do podoby ekvivalentních hydraulických parametrů CPM, lze nejlépe využít v prostoru modelu bez inženýrských objektů – důlních děl, chodeb, šachet, vrtů. Tyto objekty, pokud se v modelu vyskytují, obvykle reprezentují některou z vnitřních okrajových podmínek modelu a v jejich okolí je potřeba upravit (zjemnit) diskretizaci ECPM sítě buněk, což do modelu vrací zpět komplexitu a zvyšuje míru složitosti systému. V tomto případně je efektivnější zachovat v okolí objektů původní DFN koncept a využít možnosti vytvoření kombinovaného DFN-ECPM modelu, který program ConnectFlow rovněž nabízí.

V rámci zpracování HydroECPM modelu zájmového bloku byl použit následující postup:

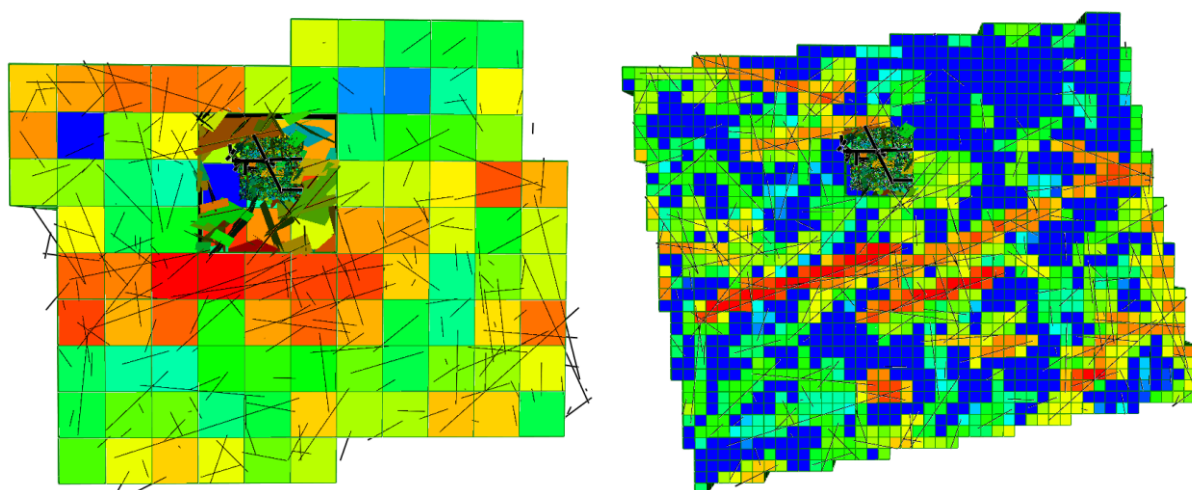
- vstupním podkladem pro realizaci HydroECPM modelu je stochastická puklinová síť modelu sHydroDFN.ZKLD4.r5 (základní kalibrovaná verze sHydroDFN použitá také při zpracování dHydroDFN),
- upscaling parametrů byl proveden ve dvou verzích diskretizace 3D buněk, viz Obr. 40 – v hrubší síti buněk $100 \times 100 \times 100$ m (HydroECPM.100) a v jemnější síti $25 \times 25 \times 25$ m, která je v detailní zájmové oblasti ještě zahuštěna na velikost $5 \times 5 \times 5$ m (HydroECPM.25),
- byly sestaveny kombinované DFN-ECPM modely – vnější doména je simulována ECPM konceptem, vnitřní detailní doména s chodbami a vrtů je řešena jako DFN model se zmenšeným rozsahem důlního díla (PVP Bukov a navazující chodby 12. patra přesahují svým rozsahem detailní oblast a byly proto v této fázi modelování oříznuty, aby nezasahovaly do ECPM oblasti),
- byl proveden výpočet proudění a jsou vzájemně porovnány výsledky.



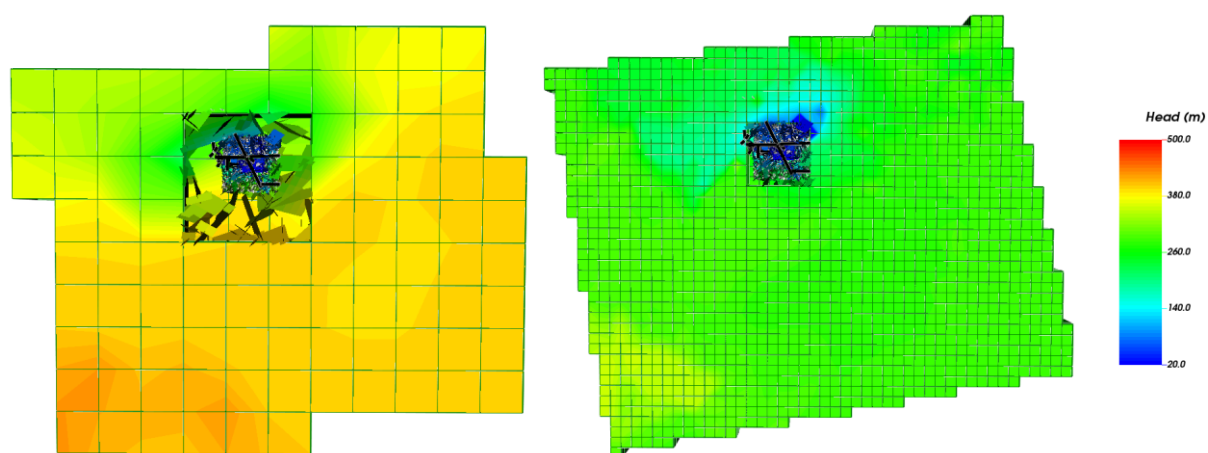
Obr. 40 Použitá diskretizace buněk HydroECPM modelu – zeleně pravidelná síť buněk $100 \times 100 \times 100$ m (HydroECPM.100), červeně pravidelná síť buněk $25 \times 25 \times 25$ m, v detailní části zahuštěná na $5 \times 5 \times 5$ m (HydroECPM.25)

Obr. 41 dokumentuje vypočtené hydraulické vodivosti v obou HydroECPM modelech se sítí buněk 100 a 25 m. Vliv diskretizace je zřejmý především v oblastech s malým propojením puklin – v síti 100 × 100 m je v ECPM modelu vypočtena vyšší hodnota vodivosti, je dosaženo lepší hydraulické komunikace mezi sousedními buňkami a model je celkově více homogenní.

Tyto rozdíly se dále propisují do simulace proudění a vypočtené tlakové pole obou HydroECPM modelů se poměrně významně liší, viz Obr. 42. V centrální části v prostoru vrtů jsou maximální rozdíly tlaků zhruba 20 m. V širším okolí v úrovni 12. patra je rozdíl tlaků již zhruba 100 m. Rozdíly se projevují i v celkové bilanci přítoků do zadané části důlního díla – v modelu HydroECPM.100 je přítok přibližně dvojnásobný v porovnání s HydroECPM.25. Shrnutí rozdílů ve výsledcích simulace proudění je společně pro vstupní HydroDFN model a oba „ekvivalentní“ HydroECPM modely uveden v Tab. 13. Ve výsledcích simulací byla očekávána výrazně lepší shoda obou přístupů (DFN a ekvivalentního ECPM).



Obr. 41 Porovnání vypočtených parametrů hydraulické vodivosti (K_{xx}) – vlevo pro model HydroECPM.100, vpravo model HydroECPM.25 (černými liniemi jsou vyznačeny vstupní HydroDFN pukliny)



Obr. 42 Porovnání vypočtených hydraulických tlakových výšek (Head) – vlevo pro model HydroECPM.100, vpravo model HydroECPM.25

Tab. 13 Shrnutí výsledků simulace proudění v HydroDFN a ekvivalentních HydroECPM modelech

Výstup modelu	HydroDFN	HydroECPM.25	HydroECPM.100
Tlak v S-27 (m)	22,6	23,0	23,7
Tlak v S-31 (m)	26,2	27,5	30,4
Tlak v S-36 (m)	50,2	61,2	82,2
Přítok do zadaného důlního díla (do okrajové podmínky) (l/s)	9,2	21,2	39,3
Délka simulace (s)	118	63	15

6.3 Optimalizace numerického modelu

Etapa optimalizace modelu (etapa 24) navazovala na zpracovaný základní numerický model a je detailně popsána v průběžné zprávě TZ 702/2023 (Zuna et al. 2023). Dle navržené koncepce byl dále rozpracován a kalibrován kombinovaný stochasticko-deterministický dHydroDFN model:

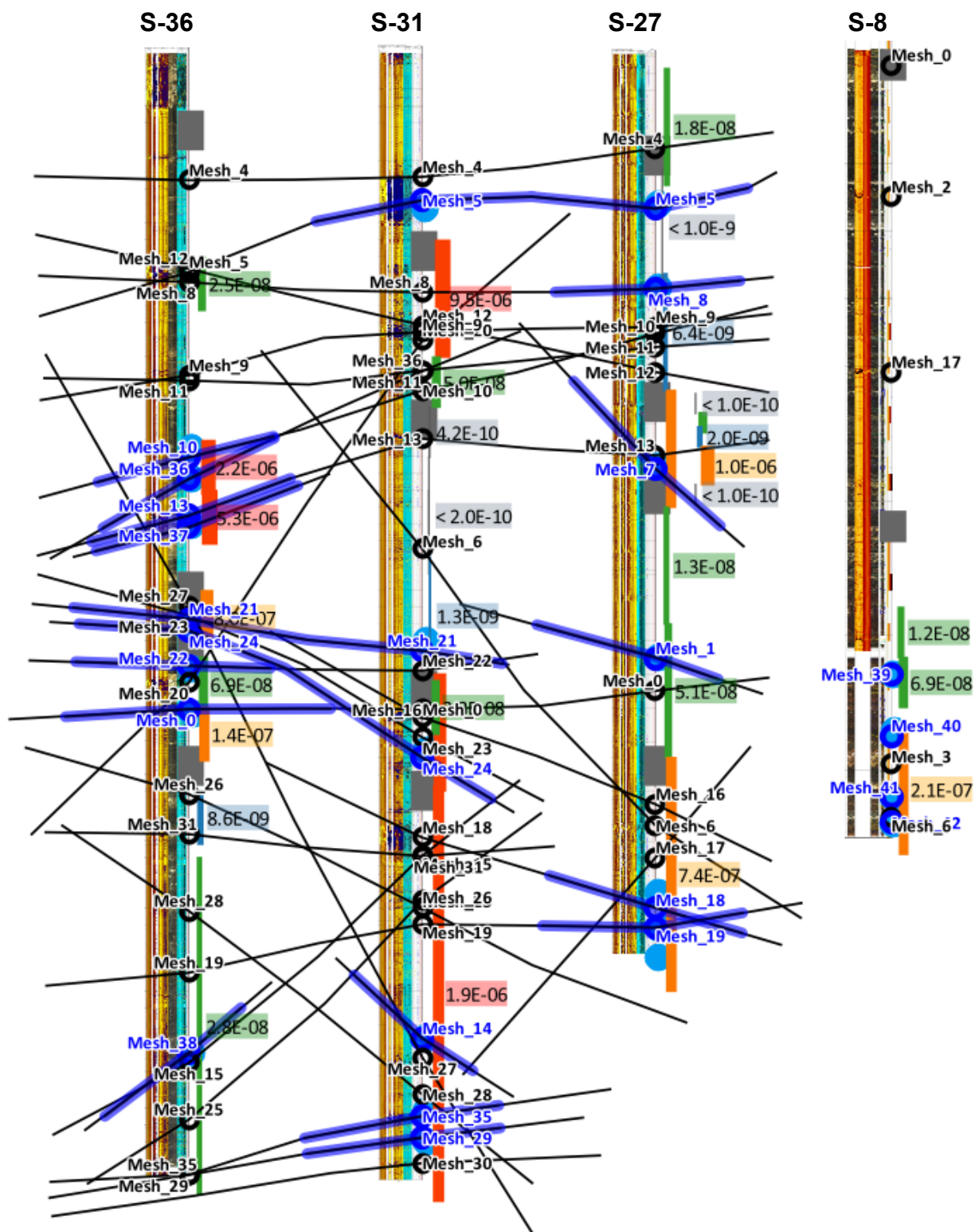
- v zájmové oblasti kolem vrtů S-27, S-31, S-36 a S-8 byl optimalizován základní semi-deterministický model puklinové sítě dGeoDFN (podmíněný měřenými daty z vrtů) verze d01s_06 s minimálním poloměrem generovaných puklin r_{min} 5 m. Semi-deterministicky zadaných puklin je 43 – průměrný sklon a směr a stochasticky generovaný střed a velikost jsou uvedeny v Tab. 14 a v Obr. 43 je vykresleno schématické propojení semi-deterministických puklin mezi průsečíky s vrty,
- v širším měřítku v oblasti, tj. mimo oblast popsaných průsečíků puklin s vrty, byla použita stochastická síť puklin sHydroDFN realizace ZKLD.4.r5 (stochastická síť puklin je generována v celé modelové doméně, jsou z ní ale odstraněny pukliny protínající zájmovou čtveřici vrtů).

Vytvořené „meshe“ semi-deterministických puklin (v programu MOVE jsou to zakřivené plochy dle skutečných souřadnic průsečíků a orientace puklin) jsou v modelu proloženy rovinou s průměrným směrem a sklonem. Modelové průsečíky puklin s vrty pak nejsou vždy přesně totožné s měřenou souřadnicí, ale mohou být mírně posunuty. Současně dochází k prohození pořadí některých průsečíků puklin, podstatné je ale zachovat kontinuitu dat a zajistit, aby daný průsečík protínal daný zapakrovaný interval vrtu. Celkem je v modelu 82 průsečíků semi-deterministických puklin s jednotlivými vrty S-27, S-31, S-36 a S-8.

Optimalizace numerického modelu byla zaměřena na úpravu geometrie semi-deterministického dHydroDFN modelu a kalibraci hydraulických parametrů semi-deterministických puklin. Optimalizace dHydroDFN modelu a transmisivity puklin byla provedena s využitím vybraných měřených dat a stavů systému a v několika modelových variantách. Hydraulická vodivost K na úsecích vrtů délky L z vodních tlakových zkoušek (VTZ), vyhodnocená podle vzorce Moye (1967), byla použita pro zadání vstupní hodnoty transmisivity puklin (transmisivita úseku je $T = K \cdot L$).

Tab. 14 Geometrické parametry puklin dGeoDFN modelu d01s_06_rmin5m a parametry pro model v ConnectFlow se čtvercovými puklinami (posun souřadnic středů puklin [x,y] o [-622900, -1129700])

Mesh ID	Dip	Strike	Azimuth	r (m)	L=2r (m)	Xc	Yc	Zc
0	39.1	122.6	212.6	34.8	69.5	628.19	749.50	4.15
1	17.0	96.0	186.0	7.4	14.9	612.44	757.75	4.66
2	65.9	118.3	208.3	7.9	15.9	627.81	775.13	16.77
3	72.2	47.4	137.4	6.1	12.3	632.06	774.50	-25.65
4	36.2	113.7	203.7	14.4	28.9	581.06	757.38	19.62
5	88.7	8.0	98.0	45.4	90.9	592.06	753.38	14.44
6	57.2	258.3	348.3	35.8	71.7	622.19	767.88	-19.79
7	9.0	69.0	159.0	9.9	19.8	614.63	756.63	9.63
8	28.8	125.2	215.2	48.9	97.7	594.94	746.75	11.49
9	36.1	123.0	213.0	7.5	15.1	596.06	750.75	10.67
10	47.1	108.2	198.2	54.6	109.1	599.75	737.13	-5.81
11	33.5	107.0	197.0	41.3	82.5	605.81	750.63	11.44
12	8.5	124.5	214.5	14.2	28.4	599.63	756.25	12.99
13	84.0	27.7	117.7	33.4	66.7	609.63	761.63	4.43
14	16.6	337.9	67.9	5.2	10.3	630.81	743.75	-13.64
15	52.9	96.6	186.6	14.0	28.1	624.94	740.75	-17.63
16	3.3	206.7	296.7	9.0	17.9	623.31	748.25	-0.94
17	66.3	11.4	101.4	11.6	23.2	628.44	764.88	-3.03
18	21.9	95.8	185.8	6.6	13.1	626.50	750.38	-5.65
19	86.4	41.6	131.6	84.2	168.4	617.00	736.25	-32.19
20	62.2	16.7	106.7	14.1	28.2	602.50	745.88	1.67
21	74.9	229.2	319.2	13.4	26.8	603.56	743.50	-6.62
22	31.8	109.4	199.4	7.1	14.2	608.88	746.63	-3.16
23	41.7	244.0	334.0	9.6	19.2	609.88	748.00	-4.95
24	44.8	88.2	178.2	9.0	18.0	609.69	749.00	-1.05
25	86.7	18.2	108.2	11.9	23.8	623.81	743.38	-19.04
26	69.7	229.4	319.4	15.4	30.8	619.75	741.88	-2.96
27	72.4	271.1	1.1	19.3	38.7	619.81	743.88	-5.57
28	27.4	258.3	348.3	14.8	29.7	625.63	743.25	-16.56
29	82.8	219.7	309.7	17.6	35.1	634.56	747.63	-29.20
30	84.6	45.3	135.3	7.3	14.6	634.81	744.75	-16.42
31	46.6	86.6	176.6	13.5	27.0	610.13	743.38	-10.28
32	80.0	360.0	90.0	5.1	10.2	606.88	769.13	20.93
33	67.1	30.6	120.6	8.4	16.8	582.38	763.50	25.99
34	60.2	9.7	99.7	12.1	24.1	584.81	762.88	25.48
35	87.4	222.6	312.6	17.6	35.1	623.31	734.00	-19.07
36	73.0	22.9	112.9	6.7	13.3	598.94	746.88	6.59
37	81.4	191.7	281.7	5.5	11.0	600.63	740.63	2.38
38	85.1	174.9	264.9	5.6	11.3	619.38	740.00	-26.85
39	16.8	42.1	132.1	5.3	10.6	623.94	774.75	-15.15
40	43.5	204.6	294.6	6.5	12.9	626.63	774.38	-22.38
41	54.4	182.1	272.1	5.0	10.0	627.63	771.50	-24.76
42	75.4	84.0	174.0	7.0	13.9	633.19	772.75	-26.58



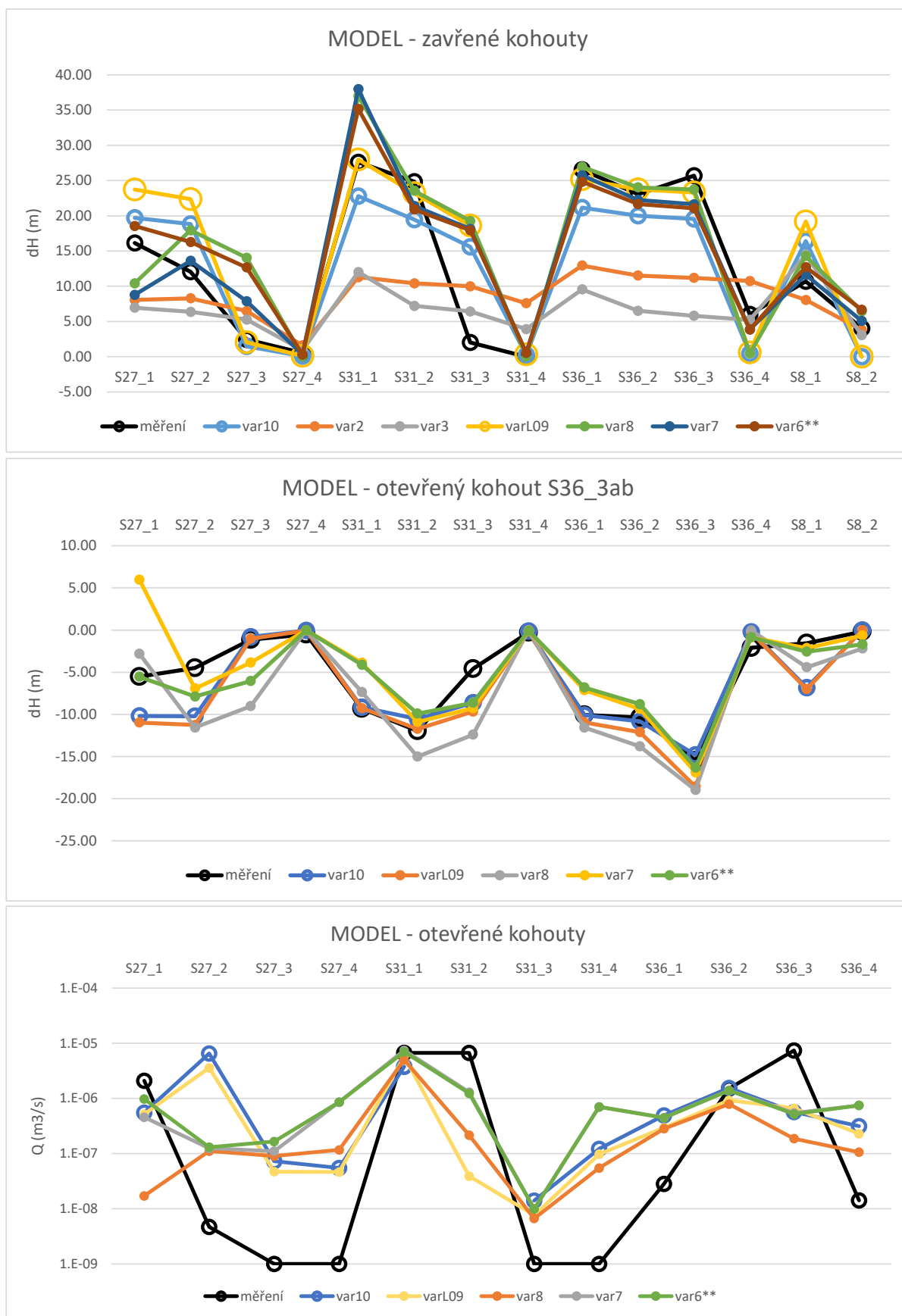
Obr. 43 dGeoDFN model – schématické propojení puklin mezi průsečky s vrty. Modře jsou zvýrazněné průsečky s identifikovanými přítoky do vrtů, hodnoty uvádějí transmisivitu z VTZ vyhodnocených podle Moye (1967)

Na sestaveném modelu byly simulovány 3 vybrané různé stavy systému, porovnány modelové a měřené výsledky a vyhodnocen další postup optimalizace:

- 1) stav s neovlivněnými tlakovými poměry při zapakrovaném systému vrtů – vyhodnoceny jsou tlaky H_i v jednotlivých intervalech vrtů a porovnány s měřením,
- 2) stav s otevřenými kohouty a odtokem vody ze všech intervalů – jsou vyhodnoceny velikosti odtoku Q_i a celkový odtok a porovnány s měřením,
- 3) stav s otevřenými kohouty pouze ve vybraném vodivém intervalu S36_3ab – je vyhodnocen odtok z otevřeného intervalu a tlaky H_i v ostatních zapakrovaných intervalech vrtů.

V rámci procesu optimalizace, respektive kalibrace modelu, byly postupně realizovány simulace s cílem identifikovat, které parametry modelu se významně podílejí na nepřesnostech modelu a je potřeba je upravit:

- byly upraveny a zvýšeny transmisivity puklin protínající horní mělké intervaly vrtů S31 a S27 (mesh 34, 4 a 5) – měřené hodnoty tlaku v intervalech jsou zde výrazně nižší než modelové a je zde zřejmě důležité propojení puklin na drenážní účinek chodeb, které nebylo identifikováno. Nebyla realizována VTZ v mělké porušené části S31, která by možná potvrdila vyšší propustnost, je zde možný vliv EIZ (Excavation Influenced Zone) apod. Transmisivita úseků s „EIZ“ byla v rámci optimalizace postupně zvýšena na $6,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,
- výrazně lepší shody modelových výsledků s měřenými tlaky bylo dosaženo při zadání naměřené hodnoty VTZ pouze do jedné vybrané pukliny. Transmisivita z VTZ byla primárně přiřazena puklině s identifikovaným přítokem, v případě více přítoků v úseku nebo naopak v úseku bez přítoku byla zadána do pukliny, která se zdála být dle schématu propojení vhodnější. Výsledkem je heterogenní tlakové pole, které se blíží měřeným hodnotám v intervalech. Lokálně lze ale pozorovat významné rozdíly – např. nízkou modelovou hodnotu tlaku v hlubokém intervalu S27_1, nebo naopak vysokou hodnotu v mělkých intervalech S31_3 a S36_4,
- současně lepší shody měřených a modelových dat bylo dosaženo při navýšení hodnot transmisivity semi-deterministických puklin (oproti hodnotám vyhodnoceným z VTZ),
- grafické porovnání měřených hodnot a modelových výsledků pro vybrané optimalizované varianty a simulované 3 stavy systému je uvedeno v Obr. 44,
- v Tab. 15 je uveden přehled měřených a modelových transmisivit a parametrů puklin ve finální optimalizované modelové variantě var10.



Obr. 44 Porovnání měření a modelových výsledků vybraných optimalizovaných variant

Tab. 15 Přehled transmisivit a parametrů puklin v optimalizované modelové variantě var10

vrt	interval	meshID	X	Y	Z	VTZ_T	VTZname	Hydro	VTZ_ID	T_MODEL	maxR
S27	o	34	585.261	756.071	22.702	1.0E-05	EIZ	0	32	6.7E-06	15.00
S27	o	4	588.346	756.018	20.849	1.0E-05	EIZ	0	32	6.7E-06	15.00
S27	4	5	592.332	755.944	18.452	1.0E-05	EIZ	1	32	6.7E-06	15.00
S27	4	8	596.358	755.876	16.033	6.4E-09	VTZ3	1	3	1.3E-08	15.00
S27	4	9	598.486	755.840	14.754	fix_5E-10	disabled	0	36	1.0E-10	3.00
S27	4	11	600.315	755.809	13.655	fix_5E-10	disabled	0	36	1.0E-10	3.00
S27	4	10	600.475	755.806	13.559	fix_5E-10	disabled	0	36	1.0E-10	0.00
S27	4	12	601.277	755.793	13.077	fix_5E-10	disabled	0	36	1.0E-10	3.00
S27	3	13	605.812	755.708	10.351	fix_5E-10	disabled	0	36	1.0E-10	3.00
S27	3	7	606.468	755.696	9.957	3.2E-07	VTZ4	1	4	6.4E-07	20.00
S27	2	1	616.209	755.530	4.105	fix_5E-10	disabled	1	36	1.0E-10	0.00
S27	2	0	617.259	755.511	3.474	5.1E-08	VTZ6	0	6	1.0E-07	12.00
S27	1	6	623.669	755.403	-0.380	fix_5E-10	disabled	0	36	1.0E-10	3.00
S27	1	16	624.782	755.383	-1.049	fix_5E-10	disabled	0	36	1.0E-10	0.00
S27	1	17	625.948	755.363	-1.749	fix_5E-10	disabled	0	36	1.0E-10	0.00
S27	1	18	628.987	755.308	-3.575	fix_5E-10	disabled	1	36	1.0E-10	0.00
S27	1	19	631.587	755.262	-5.137	7.4E-07	VTZ7	1	7	1.5E-06	6.00
S31	o	34	585.277	753.308	21.861	1.0E-05	EIZ	0	33	6.7E-06	15.00
S31	o	4	589.046	752.779	18.886	1.0E-05	EIZ	0	33	6.7E-06	15.00
S31	o	5	591.871	752.382	16.656	1.0E-05	EIZ	1	33	6.7E-06	15.00
S31	4	8	595.333	751.895	13.921	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	3.00
S31	4	12	597.470	751.596	12.236	9.5E-06	VTZ1	0	8	1.9E-05	15.00
S31	4	9	597.911	751.534	11.889	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	3.00
S31	4	20	598.999	751.381	11.031	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S31	4	36	599.468	751.315	10.660	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S31	4	11	599.486	751.313	10.647	5.0E-08	VTZ2	0	9	1.0E-07	10.00
S31	4	10	601.547	751.024	9.022	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S31	3	13	603.541	750.739	7.446	4.2E-10	VTZ3	0	10	8.4E-10	10.00
S31	3	6	608.899	749.988	3.220	< 2.0E-10	VTZ5	0	12	2.0E-10	15.00
S31	3	21	613.098	749.399	-0.093	1.3E-09	VTZ6	1	13	2.6E-09	8.00
S31	3	22	613.732	749.310	-0.593	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	3.00
S31	2	16	614.753	749.162	-1.401	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S31	2	0	615.253	749.092	-1.796	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	3.00
S31	2	24	616.093	748.975	-2.460	1.4E-06	VTZ7	1	14	2.8E-06	12.00
S31	2	23	616.738	748.884	-2.970	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S31	1	31	620.049	748.420	-5.579	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	3.00
S31	1	18	621.489	748.218	-6.715	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S31	1	15	623.635	747.917	-8.408	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	6.00
S31	1	26	623.680	747.911	-8.443	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S31	1	25	624.663	747.773	-9.219	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S31	1	19	625.246	747.691	-9.679	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	3.00
S31	1	14	630.668	746.930	-13.957	1.9E-06	VTZ9	1	16	1.9E-06	15.00
S31	1	27	632.300	746.701	-15.244	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S31	1	28	634.748	746.357	-17.175	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S31	1	35	634.771	746.354	-17.194	1.9E-06	VTZ9	1	16	1.9E-06	15.00
S31	1	29	635.345	746.273	-17.647	fix_5E-10	disabled	1	37	1.0E-10	0.00
S31	1	30	636.476	746.115	-18.539	fix_5E-10	disabled	0	37	1.0E-10	0.00
S36	4	4	588.335	749.789	16.677	neměřeno	noVTZ	0	30	2.0E-10	3.00
S36	4	5	591.421	748.542	12.711	2.5E-08	VTZ1	0	17	5.0E-08	10.00
S36	4	12	592.455	748.124	11.382	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	3.00
S36	4	8	592.502	748.104	11.321	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	3.00
S36	4	9	595.069	747.067	8.022	2.2E-06	VTZ2	0	18	4.4E-06	6.00

S36	4	11	595.821	746.763	7.055	5.3E-06	VTZ3	0	19	1.1E-05	6.00
S36	4	10	599.400	745.316	2.456	fix_5E-10	disabled	1	38	1.0E-10	0.00
S36	4	36	599.732	745.181	2.028	fix_5E-10	disabled	1	38	1.0E-10	0.00
S36	4	37	601.122	744.620	0.242	fix_5E-10	disabled	1	38	1.0E-10	0.00
S36	4	13	601.172	744.599	0.178	fix_5E-10	disabled	1	38	1.0E-10	3.00
S36	3	27	603.930	743.484	-3.377	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	0.00
S36	3	23	604.068	743.428	-3.555	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	0.00
S36	3	21	604.407	743.292	-3.990	fix_5E-10	disabled	1	38	1.0E-10	0.00
S36	3	24	605.133	743.001	-4.921	8.0E-07	VTZ4	1	20	1.6E-06	16.00
S36	2	20	605.452	742.871	-5.327	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	0.00
S36	2	22	606.034	742.636	-6.077	6.9E-08	VTZ5	1	21	1.4E-07	10.00
S36	2	0	608.912	741.475	-9.785	1.4E-07	VTZ6	1	22	2.8E-07	15.00
S36	1	26	611.871	740.282	-13.578	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	0.00
S36	1	31	611.961	740.245	-13.694	8.6E-09	VTZ7	0	23	1.7E-08	10.00
S36	1	28	613.701	739.542	-15.931	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	0.00
S36	1	19	617.573	737.977	-20.908	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	3.00
S36	1	15	619.225	737.309	-23.033	2.8E-08	VTZ8	0	24	5.6E-08	15.00
S36	1	38	619.890	737.041	-23.887	fix_5E-10	disabled	1	38	1.0E-10	0.00
S36	1	25	621.913	736.223	-26.488	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	0.00
S36	1	35	623.964	735.394	-29.125	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	3.00
S36	1	29	624.253	735.278	-29.496	fix_5E-10	disabled	0	38	1.0E-10	0.00
S8	2	0	628.200	772.500	19.888	neměřeno	noVTZ	0	31	2.0E-10	5.00
S8	2	2	628.200	772.500	12.011	neměřeno	noVTZ	0	31	2.0E-10	0.00
S8	2	17	628.200	772.500	0.930	neměřeno	noVTZ	0	31	2.0E-10	0.00
S8	1	39	628.200	772.500	-16.559	6.9E-08	VTZ7	1	26	1.4E-07	10.00
S8	1	40	628.200	772.500	-20.285	2.1E-07	VTZ8	1	27	2.1E-07	15.00
S8	1	3	628.200	772.500	-22.098	fix_5E-10	disabled	0	39	1.0E-10	0.00
S8	1	41	628.200	772.500	-24.006	fix_5E-10	disabled	1	39	1.0E-10	0.00
S8	1	6	628.200	772.500	-24.930	2.1E-07	VTZ8	0	27	2.1E-07	20.00
S8	1	42	628.200	772.500	-25.541	fix_5E-10	disabled	1	39	1.0E-10	0.00

Úpravami a optimalizací modelu bylo dosaženo výrazně lepší shody v tlakovém poli, větší rozdíly ale zůstaly v bilanci a rozložení odtoků z intervalů (viz porovnání v modelu s otevřenými kohouty ve všech intervalech), kde se liší hodnoty i o několik řádů. Především se jedná o mělké intervaly vrtů, kde jsou modelové hodnoty výrazně vyšší – může to souviset s propojením semi-deterministických puklin v mělké části na některé pukliny z vnější stochastické části, které se přes tyto pukliny mohou v modelu odvodňovat. Rozdíly jsou ale i v hlubších intervalech, např. v intervalu S31_2 a S36_3 je modelový odtok ve všech variantách zhruba o řád nižší – tyto rozdíly souvisí s propojením puklin detailní a regionální domény a lze je řešit optimalizací regionální stochastické sítě puklin na více realizacích.

Z realizace variantních modelů, při kterých byly optimalizovány hydraulické parametry semi-deterministických puklin, vyplývají především tyto závěry:

- pouze úpravou rozložení hodnot transmisivity na puklinách lze daný model optimalizovat jen částečně a omezeně – velmi důležitá je také optimalizace a zpětná úprava geometrického modelu a semi-deterministických puklin, tj. změna velikosti a především propojení puklin,
- optimalizace parametrů ukázala, že většina semi-deterministických puklin z připraveného geometrického modelu nebyla pro hydraulický model relevantní, proudění se

pravděpodobně soustředí do omezeného množství nebo částí puklin a vytváří tak velmi heterogenní tlakové pole,

- lepší shody modelu a měření bylo dosaženo při zadání transmisivity z VTZ do konkrétní pukliny – toto souvisí i s tvorbou geometrického modelu, který nelze realizovat jen na základě geologických dat, ale je nutné zajistit i příslušná vstupní hydrogeologická data – tj. je potřeba měření transmisivity na úrovni jednotlivých puklin, kdy měření VTZ na několikametrových úsecích není pro detailní zpracování puklinové sítě dostatečné,
- velikost odtoku z intervalů vrtů, respektive jednotlivých puklin, není jen lokální záležitost semi-deterministické sítě, ale je nutná také optimalizace přítoků puklinami z horninového masivu (optimalizace napojení na puklinovou síť vnější domény pomocí vícenásobných realizací stochastických sítí).

7 Speciální analýzy vrtného jádra – laboratorní testy

Na vybraných zájmových částech vrtů byly provedeny laboratorní analýzy reprezentativních horninových typů za účelem určení petrologie, mineralogie a geomechanických parametrů horninové matrice, výplní studovaných puklinových zón apod. Transportní laboratorní experimenty byly zaměřeny na testování stopovačů, jejich sorpční a difuzní parametry. Migrační laboratorní experimenty probíhaly jak na horninových vzorcích s přirozenou puklinou, tak na fyzikálním modelu (horninový blok). Metody poskytly reálné rozpětí hodnot vstupních parametrů modelů, které byly následně využity při modelování a byly validovány následnými testy ve vrtech in-situ podmínkách.

7.1 Geologická a petrografická analýza

Po orientaci jader byla provedena strukturně geologická a petrologická analýza vrtného jádra. Na vrtném jádru byly popsány jednotlivé planární strukturní prvky (pukliny, střížné pukliny, podélné pukliny, puklinové zóny, tektonické poruchy a reaktivované foliace). Strukturní a litologická data jsou přehledně shrnuta ve vrtné kolonce zpracované v softwaru LogPlot7.

Na vybraných částech vrtného jádra byly odebrány vzorky na tvorbu leštěných výbrusů, které byly podrobeny mikroskopické analýze. Odebírány byly vzorky kontrastních litologií např. amfibolity, a vzorky převládajícího horninového typu (biotit-amfibolická pararula v různých stupních migmatitizace). Celkem bylo odebráno 54 vzorků, 14 z vrtu S-27, 24 z vrtu S-31 a 16 z vrtu S-36. Podrobný popis výbrusového materiálu pro jednotlivé vrty je pak formou pasportů součástí přílohy Technické zprávy 521/2020 (Zuna et al. 2020) pro vrt S-27, vrt S-31 (Příloha 3) a vrt S-36 (příloha 6) součástí TZ 551/2021 (Zuna et al. 2021).

7.2 Studium puklinových výplní

Z vrtů S-27, S-31 a S-36 bylo odebráno celkem 74 vzorků žilné a puklinové minerální výplně. K analýzám bylo vybráno celkem 23 vzorků. Vzorky byly rozděleny podle typů mineralizace podle metodiky použité v dřívějších studiích v PVP Bukov (Bukovská et al. 2017):

- Karbonátové, příp. křemen-karbonátové žíly nad 1 cm – 9 vzorků – analýzy zahrnují hlavní prvky, stopové prvky, fluidní inkluze, izotopy C a O, izotopy Sr v karbonátech,
- Karbonátové, příp. křemen-karbonátové tenké žíly – 4 vzorky – fluidní inkluze, izotopy C a O v karbonátech,
- Křemen-živcové a křemenné žíly – 4 vzorky – fluidní inkluze,
- Sulfidická mineralizace – 6 vzorků – izotopy S v pyritech.

7.2.1 Interpretace výsledků

Křemen-živcové a křemenné žíly:

Tyto žíly jsou pravděpodobně nejstarší typ žil v dané oblasti.

Vysoké teploty homogenizace (až 330 °C) a přítomnost CO₂ v inkluzích naznačují, že žíly vznikly v závěru metamorfních procesů v oblasti.

Karbonátové a křemen-karbonátové žíly:

Jsou tvořeny především kalcitem, s ojedinělým výskytem dolomiticko-ankeritického karbonátu.

Na základě izotopického složení C a O a charakteru fluidních inkluzí byly rozlišeny tři generace žil:

Generace 1:

- Dvě žíly z vrtu S-31 (5,0 m a 16,25 m) s inkluzemi s teplotami homogenizace až 180 °C.
- Hodnoty d_{18O} fluida naznačují zdrojové solanky sedimentárních bazénů s podílem vod metamorfního původu.
- Tyto žíly odpovídají žilám rudního stádia vývoje U ložiska Rožná.

Generace 2 a 3:

- Žíly s minerály a inkluzemi s teplotami homogenizace 50 až 80 °C, respektive 100 až 150 °C.
- Hodnoty d_{18O} fluida mezi -1,5 až -14,4 ‰ (SMOW) naznačují zdrojové vody meteorického původu.
- Salinita vodného roztoku v inkluzích je variabilní (0,7 až 21,5 hmot. % NaCl ekv.).
- Tyto žíly pravděpodobně odpovídají žilným mineralizacím porudního až pouranového stádia vývoje U ložiska Rožná.

Podrobné informace a výsledky jsou součástí technické zprávy č. 5 (Zuna et al. 2023)

7.3 Transportní experimenty

Studium transportních parametrů bylo zaměřeno na testování stopovačů, jejich sorpční a difuzní parametry a současně studium transportního chování na přirozených puklinách. Na vzorcích z horninových jader (vrtů S-27, S-31 a S-36) byly pro vybrané stopovače provedeny sorpční experimenty, a to jak pro horninou matici, tak pro vzorky s puklinovými výplněmi (chlority, jílové minerály). Interakce stopovačů s horninou byla studována pomocí statických vsádkových experimentů. Jako výstup statických vsádkových experimentů byla vypočtena hodnota rozdělovacího koeficientu R_d . Protože u in-situ stopovacích experimentů s fluorescenčními barvivy se předpokládalo trvání v řádu několika hodin, v laboratorní studii byly proto provedeny kinetické sorpční experimenty. Pro vyhodnocení experimentů a pochopení procesů sorpce a difuze byla provedena charakterizace hornin: stanovení petrologického a mineralogického složení, fyzikálně-mechanické vlastnosti (porozita, hustota, specifický povrch SSA, CEC atd.).

Pro transportní experimenty ve větším měřítku byl využit granitový blok s indukovanou puklinou a vzorky vrtného jádra s přirozenou puklinou (z vrtu S36). Pro průnikové experimenty byly testovány následující stopovače: NaCl, KI, KBr, fluorescein a Rhodamin WT. On-line záznam byl proveden pomocí iontově selektivních elektrod ISE (I^- , Br^-) a UV Vis detektorů. Pro odběr vzorků a následnou analýzu koncentrace stopovací látky (Cl^- , fluorescein, Rhodamin WT) byl využit programovatelný sběrač frakcí. Současně byly testovány průnikové křivky v závislosti na rozdílných průtocích a tlakových gradientech.

Popisy testů a výsledky provedených experimentů jsou součástí TZ 551/2021 (Zuna et al. 2021)

7.4 Geotechnické zkoušky

Popis geotechnických vlastností testovaných hornin byl proveden ve vazbě na jejich petrografické, strukturní složení a texturní anizotropii. Studovanými parametry byly: pevnost v příčném tahu, pevnost v prostém tlaku, pevnost v tlaku, modul přetvárnosti, abrazivnost horniny, součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita, měrná hmotnost, objemová hmotnost, celková pórovitost, otevřená pórovitost, rychlost průchodu podélných ultrazvukových vln, koeficient hydraulické vodivosti horniny. Metodiky laboratorních zkoušek a analýz vycházejí z běžných technických norem (ČSN, EN, ISO), souboru metod doporučených International Society for Rock Mechanics, případně z dalších předpisů a doporučení.

Výsledky laboratorních zkoušek jsou přehledně zachyceny v následující tabulce (Tab. 16).

Laboratorní tělesa byla testována ve směru osy vrtu, která je šikmá k foliaci. Takto orientovaná foliace nepříznivě ovlivnila velikost hodnot pevnosti v prostém tlaku, kdy se několik těles „usmyknulo“ po takto predisponované ploše.

Stanovené hodnoty parametru m z triaxiálních zkoušek jsou v intervalu 13,3–18,5. Pro migmatitickou rulu by se dle výsledků daly očekávat vyšší hodnoty ($m \sim 23$ –33). Stanovené nižší hodnoty naznačují, že dochází k porušování v rovině foliace, která je u měřených vzorků vhodně orientovaná vůči směru zatěžování. Tím dochází k porušování paralelně se zrny biotitu a získané hodnoty tak spíše odpovídají svorům.

Anizotropie rychlostí seismických vln je do 10 %. Rychleji se propagují vlny jdoucí v ploše foliace než napříč.

Tab. 16 Mechanicko-fyzikální vlastnosti hornin

Vrt	Pevnost v příčné m tahu (MPa)	Pevnost v prosté m tlaku (MPa)	Pevnost v triaxiál ním tlaku (-)	Modul pružnos ti (GPa)*	Modul přetvárn osti (GPa)*	Poisson ovo číslo (-)*	Abráziv nost CAI (-)	Tepelná vodivost (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Tepelná kapacita (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	Otevře ná pórovit ost (%)	Celková pórovito st (%)	Objemo vá hmotnos t (kg·m ⁻³)	Rychlos t P-vln (km·s ⁻¹) min/ma x	Rychlos t S-vln (km·s ⁻¹) min/ma x	Koeficie nt hydrauli cké vodivost i (m·s ⁻¹)
S-27	8,4	77,0	13,8	**	**	**	4,3	2,32	2,14	0,20	***	2810	6,752/ 6,345	3,898/ 3,645	< 10 ⁻¹⁴
S-31	6,2	91,0	18,5	88,0	87,0	0,27	3,7	2,29	1,97	0,39	1,77	2848	6,401/ 6,270	3,893/ 3,617	< 10 ⁻¹⁴
S-36	8,1	95,0	13,3	83,0	87,0	0,27	3,8	2,18	1,95	0,18	3,93	2774	6,655/ 6,152	3,899/ 3,589	< 10 ⁻¹⁴

*Pozn. Vyhodnoceno v oboru napětí 20–40 % UCS.

**Pozn. Nelze vyhodnotit. Vzorek se rozpadal po plochách foliace.

***Pozn. Nelze vyhodnotit. Hodnota specifické hustoty je nižší než hodnota suché objemové hmotnosti.

8 Hydraulické testy

Hydraulické testy byly po odvrtání vrtů zaměřeny na studium hydraulických parametrů pomocí intervalových vodních tlakových zkoušek (VTZ) a určeny nejvíce vodivé a propojené intervaly vrtů S-27, S-31 a S-36. Po instalaci multipakrových systému a ustálení tlakových poměrů byly studovány výtoky z jednotlivých intervalů a sledovány tlakové změny pomocí instalovaných piezometrů. Pro optimalizaci vstupních parametrů testů byly provedeny hydraulické dipólové testy. Před stopovací zkouškou byl proveden hydraulický test pro ověření hydraulických podmínek ve studovaných intervalech, tlakové reakce v intervalech a měřeny průtokové bilance pro výpočet koncentrace a bilance stopovače. Výsledky byly následně využity pro prediktivní model a optimalizaci nastavení parametru zkoušky. Detailní popis a výsledky testů jsou součástí průběžné zprávy č. 5 (Zuna et al. 2023). Na základě provedených zkoušek byla optimalizována instrumentace testu, modifikace měřicího systému a byly upraveny vstupní parametry stopovací zkoušky.

8.1 Hydraulické zkoušky ve vrtech – vodní tlakové zkoušky

Pro vodní tlakové zkoušky (VTZ) bylo navrženo a následně vyrobeno mobilní zařízení. Jednalo se jak o vývoj koncepčního návrhu nově vyvíjené aparatury, tak i o následnou fyzickou výrobu, testování a využití při vodních tlakových zkouškách a stopovacích experimentech (Etapa 6).

Cílem hydraulických testů ve vrtech bylo zjištění hydraulických parametrů horninového prostředí v jednotlivých úsecích vrtů, ve kterých pak byly instalovány multipakrové systémy, a ve kterých se následně prováděly transportní experimenty. Získaná data měla rovněž sloužit jako vstup pro tvorbu hydraulických transportních modelů.

V letech 2020 až 2021 byly realizovány intervalové vodní tlakové zkoušky ve vrtech S-27, S-31, S-36 a S-8. V těchto vrtech bylo otestováno celkem 32 intervalů. Podrobnosti a výsledky měření VTZ jsou podrobně popsány v technických zprávách (vrt S-27, Zuna et al. 2020), vrty S-31, S-36 v TZ č. 3 (Zuna et al. 2021)

Testované úseky ve vrtech byly vymezeny dvojicí hydraulických pakrů GeoPro Bimbar 1 o průměru 72 mm, které byly nafukovány vodou pomocí ruční tlakové pumpy. Výjimkou byly nejhlubší intervaly, které byly vymezeny pouze koncovým pakrem a testovaly se úseky od pakru „do dna“. Délka těsnicího elementu pakru byla 0,5 m. Pakry byly nafukovány dle potřeby obvykle na tlak 20 až 25 bar, což zajišťovalo zcela těsné vymezení testovacího intervalu. Vodní tlakové zkoušky byly prováděny pomocí aparatury sestávající se z vysokotlaké pumpy, čidla tlaku, průtokoměru a dataloggeru.

Každý z testovaných intervalů byl otestován souborem následujících zkoušek (pokud není uvedeno jinak):

- 1) Počáteční VTZ zkouška se sestávala z pulzního testu, kdy byl do vymezeného úseku vrtu rychle aplikován tlakový puls o velikosti 5–6 bar. Vrt byl následně hydraulicky uzavřen a byl sledován pokles tlaku v průběhu času až do ustálení přirozeného hydraulického tlaku. Již na základě rychlosti poklesu tlaku v průběhu pulzního testu bylo možné kvalitativně odhadnout propustnost daného úseku vrtu a připravit vhodnou konfiguraci VTZ zařízení pro vodní tlakovou zkoušku.

2) Po pulzním testu následovala injektážní tlaková zkouška v konfiguraci s konstantním injektážním tlakem nebo s konstantním injektážním průtokem. U úseků s nižší propustností byla volena varianta tlakové zkoušky s konstantním injektážním průtokem a byl sledován nárůst tlaku v testovaném intervalu až do ustálení konstantní hodnoty tlaku. Pro intervaly s vyšší propustností byla provedena injektážní tlaková zkouška s konstantním injektážním tlakem a zkouška trvala dle potřeby až do ustálení konstantního průtoku. Pro zkoušky s konstantním injektážním tlakem byl zvolen takový tlak, aby „přetlačil“ přirozený hydraulický tlak ve zkoušených etážích. Jako zdroj tlakové vody bylo použito vysokotlaké čerpadlo nebo Grundfos MP1. Délka jednotlivých injektážních zkoušek v obou variantách provedení se pohybovala v řádu několika jednotek hodin v závislosti na propustnosti konkrétního zkoušeného intervalu a rychlosti ustalování měřených parametrů.

3) Třetím typem hydraulických zkoušek provedeným na etážích vrtů byly poklesové zkoušky. Ty byly prováděny zpravidla po ukončení předchozí injektážní tlakové zkoušky (viz výše). Poklesová tlaková zkouška byla zahájena uzavřením vrtu a následně byl sledován úbytek tlaku až do jeho ustálení. V závislosti na propustnosti testovaného úseku a množství injektované vody v předchozím testu se tlak v testovaném úseku vrtu ustálil v rozmezí několika minut až hodin. Ne vždy odpovídalo ustálení tlaku po poklesové zkoušce ustálenému tlaku po pulzním testu na počátku testování, což je zapříčiněno porušením hydraulické rovnováhy prostředí během injektážních testů.

V několika případech, kdy tlak během pulzní zkoušky prakticky neklesal, nebo klesal velmi pomalu (1bar/15minut), byla provedena pouze časově omezená pulzní zkouška a intervalu byla připsána limitní propustnost ($< 5 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

8.1.1 Vyhodnocení VTZ

Primární data získaná v průběhu měření bylo třeba při vyhodnocení nejdříve vyčistit od chybných údajů a artefaktů měření. Vyčištěná primární data z hydraulických zkoušek byla následně vyhodnocena pomocí vzorce pro ustálené proudění dle Moye (1967). Vyhodnocené hydraulické parametry jsou uvedeny v celkovém přehledu Tab. 17.

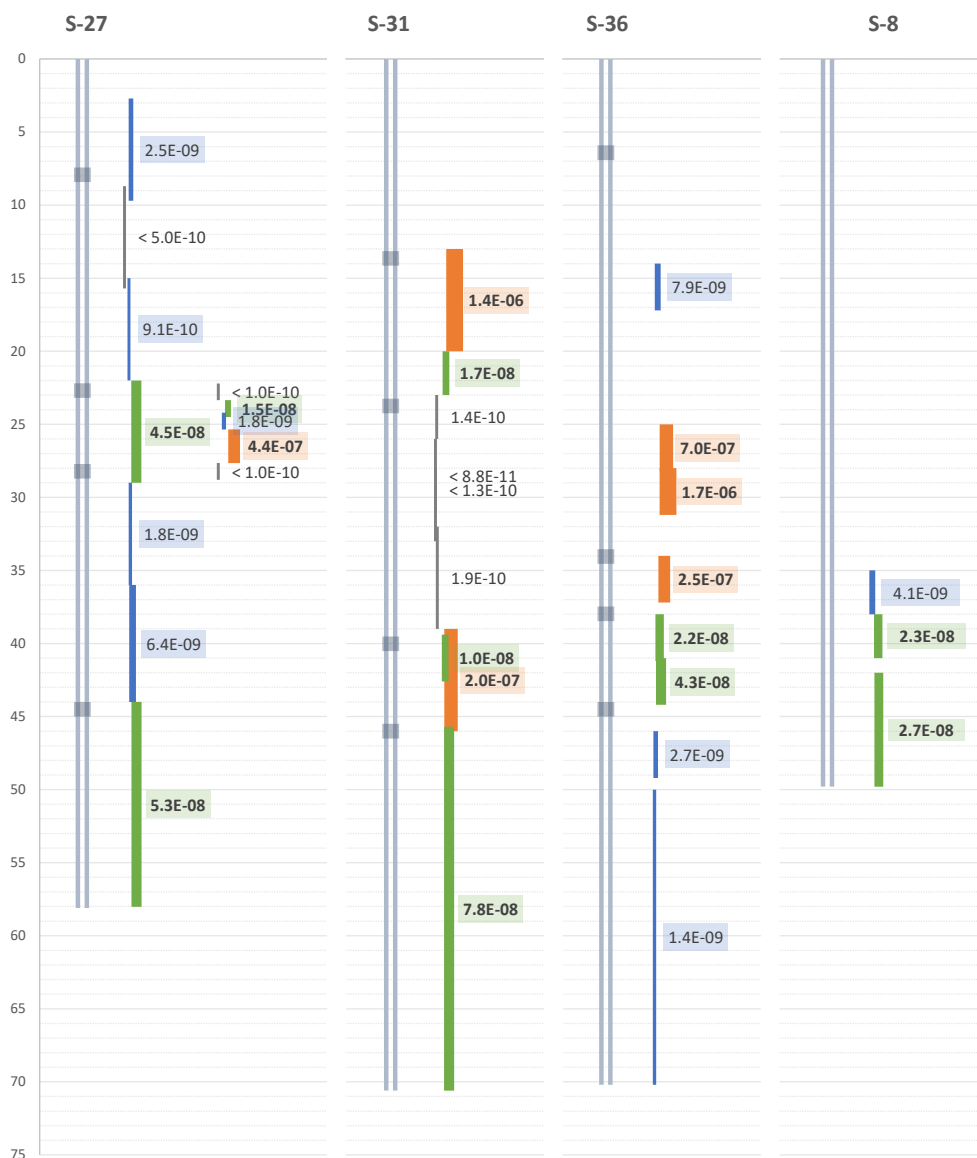
Tab. 17 Vyhodnocení VTZ ve vrtech S-27, S-31, S-36 a S-8

	Metráž od	Metráž do	Přirozený hydrostatický tlak, výška nad ústím	Typ testu	Testovací / ustálený průtok Q	Nárůst tlaku (dP)	Hydraulická vodivost k	Pozn.
	m	m	m		$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	m	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
S-27_VTZ1	2,7	9,7	4,28	konst. Q	$1,67 \cdot 10^{-7}$	8,7	$2,54 \cdot 10^{-9}$	
S-27_VTZ2	8,7	15,7	-	pouze pulzní	0		$< 5 \cdot 10^{-10}$	Velmi nepropustná zóna, nedoměřeno z důvodu časové

								limitace, odhad k
S-27_VTZ3	15	22	5,2	konst. Q	$1,67 \cdot 10^{-7}$	22,8	$9,13 \cdot 10^{-10}$	
S-27_VTZ4	22	29	0,82	konst. P	$1,02 \cdot 10^{-5}$	29,2	$4,51 \cdot 10^{-8}$	
S-27_VTZ5	29	36	2,6	konst. Q	$1,67 \cdot 10^{-7}$	11,6	$1,86 \cdot 10^{-9}$	
				konst. P	$7,67 \cdot 10^{-7}$	57,4	$1,76 \cdot 10^{-9}$	
S-27_VTZ6	36	44	13,0	konst. P	$2,35 \cdot 10^{-6}$	47,0	$6,40 \cdot 10^{-9}$	
S-27_VTZ7	44	58,02	11,4	konst. P	$3,93 \cdot 10^{-5}$	48,7	$5,30 \cdot 10^{-8}$	
S-31_VTZ1	13	20	3,6	konst. P	$4,88 \cdot 10^{-5}$	4,41	$1,35 \cdot 10^{-6}$	
S-31_VTZ2	20	23	1,4	konst. P	$4,33 \cdot 10^{-6}$	61,34	$1,65 \cdot 10^{-8}$	
S-31_VTZ3	23	26	16,51	konst. Q	$1,00 \cdot 10^{-7}$	165	$1,41 \cdot 10^{-10}$	dP odhad
S-31_VTZ4	26	33	19,8	konst. Q	$1,67 \cdot 10^{-7}$	230	$<8,81 \cdot 10^{-11}$	dP odhad
S-31_VTZ5	28	31	<17,3	konst. Q	$8,33 \cdot 10^{-9}$	15	$<1,30 \cdot 10^{-10}$	dP odhad
S-31_VTZ6	32	39	12,77	konst. Q	$1,67 \cdot 10^{-7}$	108	$1,88 \cdot 10^{-10}$	dP odhad
S-31_VTZ7	39	46	22,11	konst. P	$1,27 \cdot 10^{-5}$	7,78	$1,98 \cdot 10^{-7}$	
S-31_VTZ8	39,4	42,6	17,38	konst. P	$6,97 \cdot 10^{-7}$	15,64	$1,04 \cdot 10^{-8}$	
S-31_VTZ9_a	45,7	71	11,06	konst. P	$6,91 \cdot 10^{-5}$	37,27	$7,93 \cdot 10^{-8}$	
S-31_VTZ9_b	45,7	71	11,06	konst. P	$6,69 \cdot 10^{-5}$	37,49	$7,64 \cdot 10^{-8}$	
S-36_VTZ1	14	17	0,83	konst. P	$2,04 \cdot 10^{-6}$	60,6	$7,92 \cdot 10^{-9}$	
S-36_VTZ2	25	28	6,02	konst. P	$5,08 \cdot 10^{-5}$	17,0	$7,03 \cdot 10^{-7}$	přímá komunikace s int. 28–31 m
S-36_VTZ3_a	28	31	0,07	konst. P	$4,05 \cdot 10^{-5}$	4,8	$1,98 \cdot 10^{-6}$	přímá komunikace s int. 25–28 m
S-36_VTZ3_b	28	31	0,15	konst. P	$6,70 \cdot 10^{-5}$	11,6	$1,36 \cdot 10^{-6}$	
S-36_VTZ4	34	37	21,07	konst. P	$3,87 \cdot 10^{-5}$	36,5	$2,49 \cdot 10^{-7}$	
S-36_VTZ5	38	41	6,10	konst. P	$6,14 \cdot 10^{-6}$	66,8	$2,16 \cdot 10^{-8}$	
S-36_VTZ6	41	44	6,83	konst. P	$9,93 \cdot 10^{-6}$	54,3	$4,30 \cdot 10^{-8}$	
S-36_VTZ7	46	49	6,45	konst. P	$6,45 \cdot 10^{-7}$	56,1	$2,70 \cdot 10^{-9}$	
S-36_VTZ8	50	70,2 (dno)	11,50	konst. P	$1,33 \cdot 10^{-6}$	49,6	$1,40 \cdot 10^{-9}$	
S-8_VTZ1	2	5	-	pouze pulzní	-	-	$<5 \cdot 10^{-10}$	Velmi nepropustná zóna, nedoměřeno z důvodu časové limitace, odhad k
S-8_VTZ2	5	8	-	pouze pulzní	-	-	$<5 \cdot 10^{-10}$	
S-8_VTZ3	9	12	-	pouze pulzní	-	-	$<5 \cdot 10^{-10}$	
S-8_VTZ4	19,5	22,5	-	pouze pulzní	-	-	$<5 \cdot 10^{-10}$	
S-8_VTZ5	26,8	29,8	-	pouze pulzní	-	-	$<5 \cdot 10^{-10}$	

S-8_VTZ6	35	38	9,89	konst. P	$8,23 \cdot 10^{-7}$	50,2	$4,07 \cdot 10^{-9}$	
S-8_VTZ7	38	41	6,32	konst. P	$5,34 \cdot 10^{-6}$	57,4	$2,31 \cdot 10^{-8}$	
S-8_VTZ8	42	49,8	3,21	konst. P	$2,03 \cdot 10^{-5}$	57,6	$4,05 \cdot 10^{-8}$	

Souhrnný přehled vyhodnocených hydraulických vodivostí z VTZ ve vrtech S-27, S-31, S-36 a S-8 je na Obr. 45.



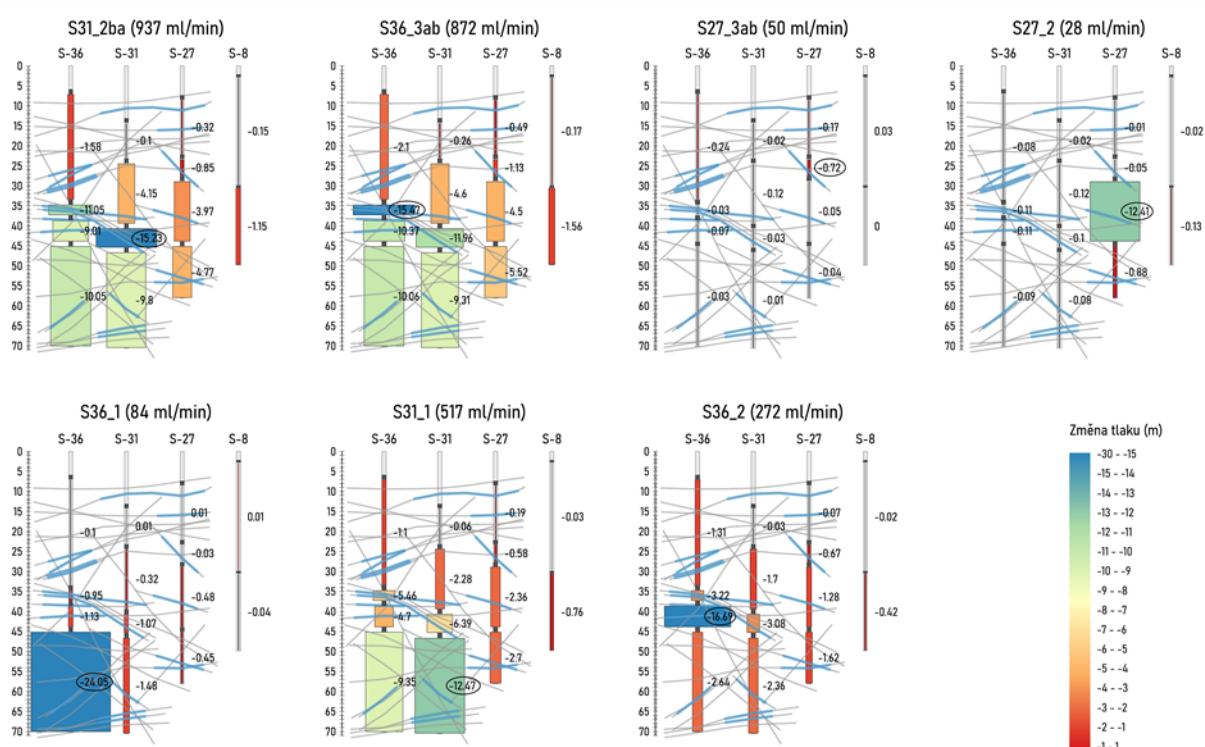
Obr. 45 Přehled vyhodnocených hydraulických vodivostí z VTZ ve vrtech S-27, S-31, S-36 a S-8

8.2 Hydraulické testy mezi vrtů

8.2.1 Tlakové změny - průtoky

Po instalaci všech multipakových systémů do vrtů S-27, S-31, S-36 a S-8 byly vrtů uzavřeny pro ustálení tlakových poměrů. Po ustálení tlaků v horninovém prostředí jednotlivých vrtů byly provedeny testy hydraulického propojení pomocí otevírání/zavírání studovaných intervalů. Na základě zjištěných výsledků byly následně provedeny pulsní testy.

Na Obr. 46 jsou uvedeny ustálené hodnoty odtoku z otevřeného úseku vrtů a hodnoty snížení tlaku na konci realizovaných testů (hodnoty poklesu tlaku jsou uvedeny pro maximální snížení v testovaném otevřeném úseku a tlakové odezvy v ostatních uzavřených intervalech multipakrů).



Obr. 46 Testy otevírání intervalů – tlakové odezvy a hydraulická komunikace mezi intervaly vrtů

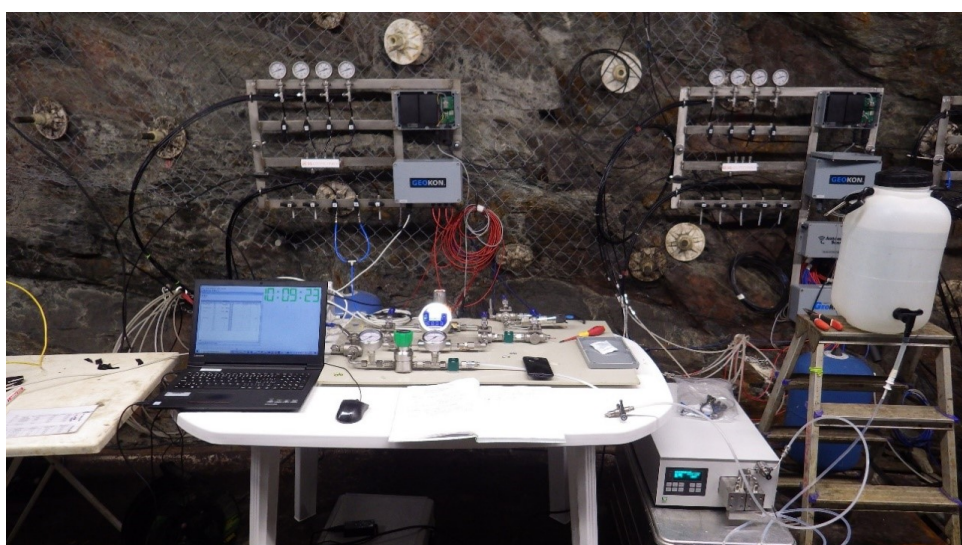
Největší tlakové odezvy v uzavřených úsecích byly zjištěny po otevření intervalu S36_3 – v řádu deseti metrů v sousedních úsecích až jednotek metrů ve vzdálenějších úsecích. Změny v řádu decimetrů v mělkých úsecích vrtů S-27, S-31 a S-8 souvisí s velmi malým přirozeným přetlakem v těchto úsecích. Naopak nejmenší tlaková odezva na relativně vysoký pokles tlaku v testovaném intervalu a nízké hodnoty odtoku byly zjištěny při testech S27_2 a S36_1 – tyto úseky vrtů jsou velmi málo vodivé s nízkou transmisivitou protínajících puklin. Malé změny tlaku (0,72 m) a velmi malý odtok (50 ml/min) v úseku S27_3 souvisí s malým přirozeným přetlakem v úseku, tj. větší snížení tlaku v tomto intervalu nelze dosáhnout.

Na základě vyhodnocených „ustálených“ hodnot odtoku a změny tlaku v otevřených úsecích byla vypočtena hydraulická vodivost testovaného intervalu podle Moye (1967). U většiny intervalů byla sledována velmi dobrá shoda hodnot s výsledky dříve realizovaných VTZ (před usazením multipakrů).

Na základě zjištěných výsledků byly následně provedeny pulsní testy. Po jejich vyhodnocení byla provedena optimalizace instrumentace a následovala série dlouhodobějších hydraulických zkoušek. Výsledky testů jsou součástí průběžné zprávy č. 4 (Zuna et al. 2022).

8.2.2 Realizace hydraulických pulsních testů

Na základě výsledků testů průtoků a intervalových zkoušek byly navrženy hydraulické pulsní testy. Pro aplikaci konstantního průtoku byla s ohledem na parametry prostředí využita přesná HPLC pumpa (ECP201L). Měření tlaků bylo prováděno tlakovými čidly (JSP) se záznamem dat (Comet MS6). Tlaková čidla byla připojena na vstup měřeného intervalu a na ústí multipakru. Pro hydraulické testy byla s ohledem na vysokou spotřebu použita podzemní voda z vrtu S-1.



Obr. 47 Ukázka instrumentace pulsních testů

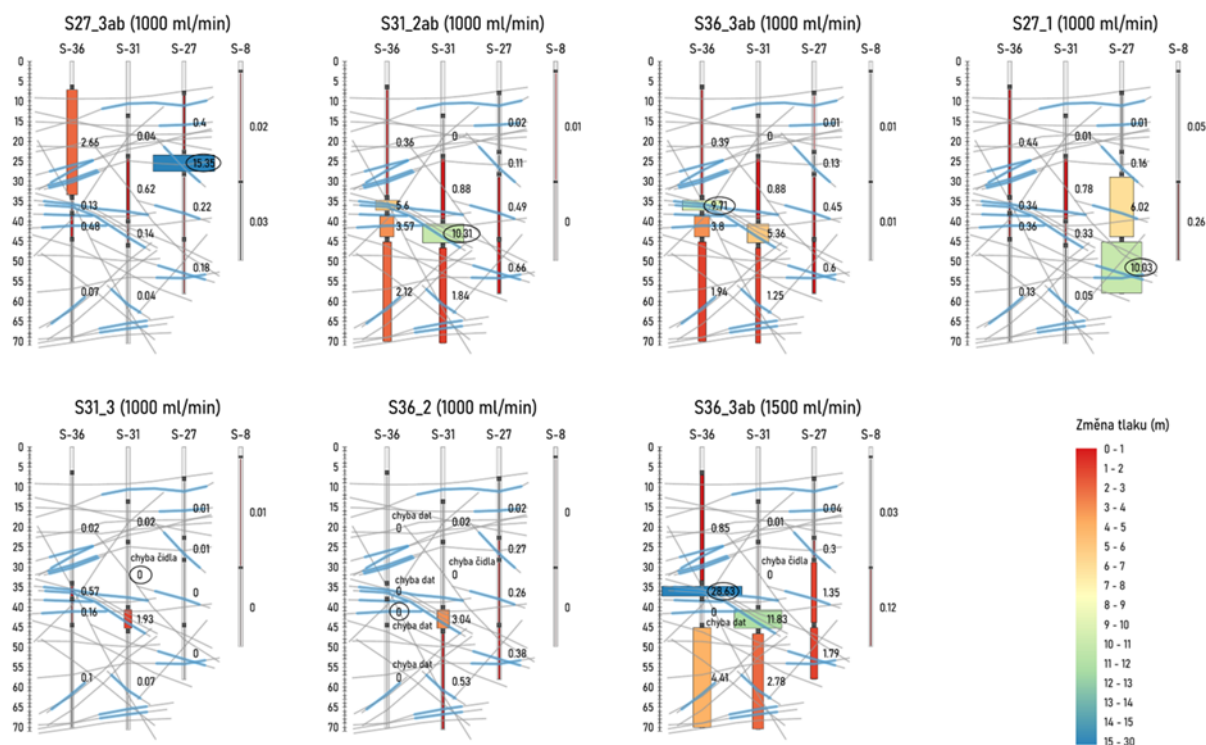
Na základě předešlých zkoušek byl injektován průtok 1,0 l/min po dobu 10 min u testovaných intervalů S27_3, S31_2, S36_3 (oba vstupy) a u intervalů S27_1, S31_3, S36_2 byl aplikován průtok 1,0 l/min po dobu 5 minut, injektáž 1,5 l/min do intervalu S36_3.

Při pulsních testech bylo změnou tlakového pole zasaženo „blízké“ okolí testovaného úseku (do vzdálenosti jednotek až desítek metrů), nedochází ve zkoumaném prostředí k významnějšímu ovlivnění tlakových poměrů na větší vzdálenost. Současně celý systém se v relativně krátké době vrací do svého původního stavu, což umožňuje realizovat větší množství testů s cílem analyzovat vzájemnou hydraulickou komunikaci mezi jednotlivými intervaly vrtů než u klasických dlouhodobějších zkoušek s ustáleným prouděním. Nicméně ty jsou vhodnější pro vyhodnocení hydraulických parametrů a pro realizaci stopovacích testů.

Na schématickém Obr. 48 jsou uvedeny maximální hodnoty tlaku v intervalech v průběhu pulsních testů:

- testy potvrdily velmi dobrou vzájemnou komunikaci intervalů S31_2 a S36_3,
- interval S27_3 je v hydraulické spojitosti s „mělkým“ intervalem S36_4 – poměrně překvapující je daleko menší tlaková odezva v sousedním vrtu S31,
- hluboký interval S27_1 hydraulicky téměř nekomunikuje s hlubokými intervaly vrtů S31 a S36, ale více komunikuje opět s mělkými intervaly S31_3 a S36_4.

Detailní informace o instrumentaci testů, měřených parametrech a výsledky zkoušek jsou uvedeny v technické zprávě 630/2022 (Zuna et al. 2022).



Obr. 48 Pulzní testy – tlakové odezvy a hydraulická komunikace mezi intervaly vrťů

8.2.3 Injektážní dipólové testy

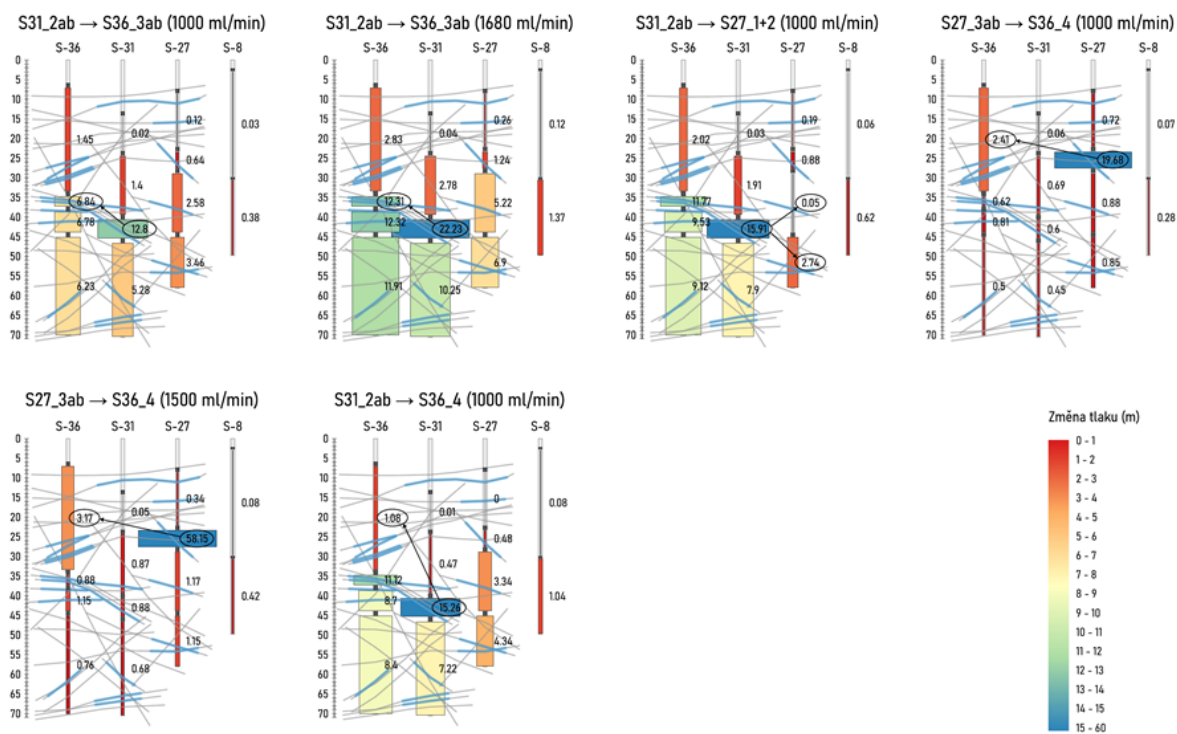
Na základě vyhodnocených testů otevírání/zavírání intervalů a pulsních testů byly vybrány zkušební intervaly a určeny průtoky (1–1,7 l/min) pro injektážní dipólové testy. Pro dipólové testy byla využita stejná instrumentace jako při pulzních testech. Pro vyšší průtoky než 1 l/min bylo využito čerpadlo G13 s frekvenčním měničem.

V důsledku vtlačení vody do zájmového intervalu dochází k nárůstu tlaku v celém propojeném systému puklin – největší změny tlaku byly dosaženy dle předpokladu ve vtlačném úseku S31_2. Malý průměr přívodních hadiček způsobuje významné tlakové ztráty nejen na injektážní (S31_2), ale i odtokové větvi (S36_3) – důsledkem je proto nárůst tlaku i v těchto intervalech, přestože je udržována konstantní hladina na výtok z hadičky. Při daných měřených odtocích větších než zhruba 450 ml/min je proudění v hadičce turbulentní a tlakové ztráty jsou významnější. Tento poznatek je důležitý pro další projekty především pro zóny s vysokými průtoky/odtoky.

Na schématickém Obr. 49 jsou uvedeny výsledky maximálních změn tlaku na konci realizovaných dipólových injektážních testů, tj. přibližně při ustálení tlakových poměrů a hlavní zjištění:

- testy S31_2ab → S36_3ab (mezi velmi dobře propojenými intervaly v hlubší části masivu) ověřily velikosti odtoků a tlakových změn důležitých pro návrh stopovacích testů,
- propojení v hlubší části masivu mezi sousedními S31 a S27 není tolik významné, hydraulicky lepší propojení puklin je v hlubším intervalu S27_1,

- v mělké části masivu mezi S27_3 a S36_4 jsou i při vysokých tlacích v injektovaném intervalu měřeny relativně malé tlakové odezvy v ostatních úsecích a tlakové pole je zde zřejmě významně ovlivněno propojením puklin s chodbami důlního díla, přestože nejsou pozorovány žádné významnější výtoky ze stěn.



Obr. 49 Dipólové injektážní testy – tlakové odezvy a hydraulická komunikace mezi intervaly vrtů

9 Realizace a vyhodnocení stopovacích testů

9.1 Laboratorní zkoušky – přípravy testů

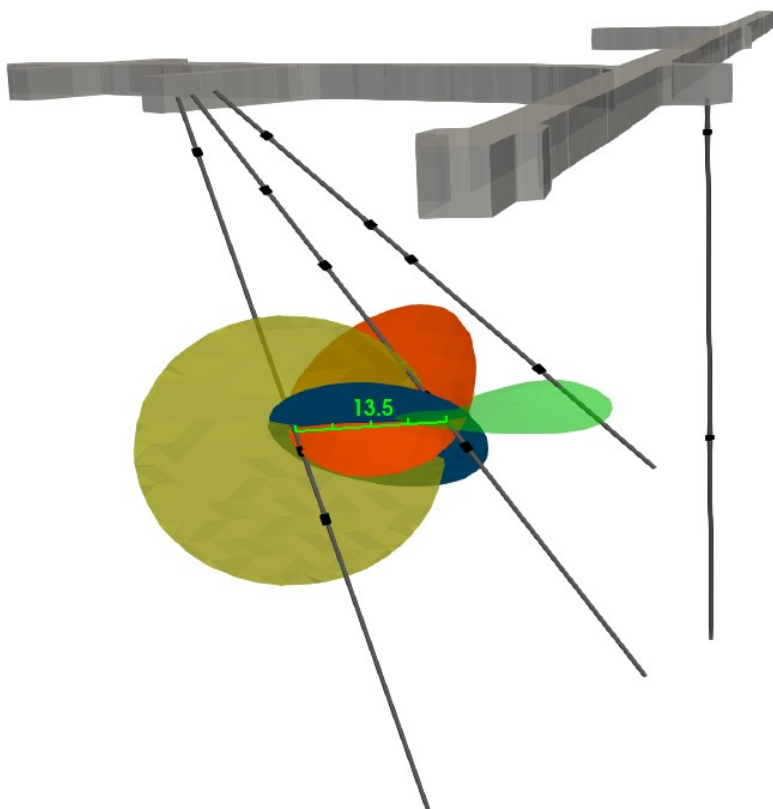
Laboratorní zkoušky v etapě 25 byly zaměřeny na doplňující studium sorpčních vlastností vybraných stopovačů na horninový materiál (hornina, puklinové výplně) a difúzní experimenty na horninové matrici. Současně probíhaly transportní experimenty na přirozených puklinách odebraných z vrtných jader. Transportní experimenty byly prováděny na přirozených puklinách jak s neaktivními stopovači (KI, Flurescein, Rhodamin), tak aktivními stopovači (HTO, ^{22}Na , ^{134}Cs , ^{133}Ba). Vizualizace transportu byla provedena pomocí μCT analýzy a následné měření na GeoPET tomografii (^{18}F). Pro vizualizaci 3D distribuce aktivity po průnikových experimentech s radionuklidy (Cs, Ba) byla použita nedestruktivní analýza pomocí emisního výpočetního gama tomografu (SPECT). Cílem zkoušek bylo studium transportu na reálné puklině, vývoj a testování navržené instrumentace. V etapě 25 byly také provedeny doplňkové testy a zkoušky pro využití více stopovačů současně „koktejl“ (např. Fluorescein x Rhodamin WT), vývoj a optimalizaci měřicího systému a současně testování systému pro in-situ testy. Pro in situ experimenty se laboratorně ověřilo využití solí (KCl tak KI) za možného využití měření koncentrace jodidu pomocí ISE a současně konduktivity (EC). Při transportních experimentech nedocházelo k sorpci fluoresceinu, pokud byl aplikován samostatně, avšak v koktejl s Rhodaminem vykazoval mírné zvýšení sorpce, současně byl pozorován posun maximálního píku na přirozených puklinách (vliv puklinové výplně).

9.2 Stopovací testy in situ

Cílem stopovacích testů je zvýšit porozumění transportu vybraných stopovačů v puklinovém systému, zlepšit schopnost jeho predikce a poskytnout tak vstupní data pro modelování transportu. K volbě vhodné metodiky je nutné přistupovat s dobrou znalostí horninového prostředí, hydraulických poměrů a chování dané stopovací látky v horninovém prostředí. Vzhledem k širokému spektru procesů, které probíhají v horninovém prostředí, ať už vlivem vlastností hornin či vlivem složení podzemní vody, je vhodné využití širšího spektra stopovacích látek. Jednotlivé průnikové křivky pak popisují vliv výše zmíněných parametrů na migraci stopovačů (Zuna et al. 2023).

Na základě výsledků monitoringu a hydraulických testů provedených v předešlých etapách projektu byly vybrány nejvhodnější komunikující intervaly a v rámci etapy 26 byly činnosti zaměřeny na stopovací zkoušky v in-situ. Pro stopovací zkoušky byla vyvinuta, otestována a využita instrumentace jak pro samotnou realizaci experimentu, tak jeho monitoring. V rámci laboratorních testů a stopovacích zkoušek byly testovány detekční systémy pro měření průtoku, koncentrací jodidu, barviv, např. fluoresceinu, a konduktivity. Na základě vyhodnocení hydraulických testů a prediktivních modelů byly provedeny zkoušky zaměřené především na aktivní zóny ve vybraných intervalech.

Před stopovací zkouškou byl proveden hydraulický test pro ověření hydraulických podmínek ve vybraných intervalech (S31_2 a S36_3). Oba intervaly jsou vystrojeny 2 vstupy a „mrtvý“ objem vyplněn silonovou vycpávkou. Na základě geometrického modelu je transportní vzdálenost mezi intervaly kolem 13,5 m (Obr. 50).



Obr. 50 Ukázka – model transportní vzdálenosti S36_3 a S31_2 (13.5 m)

Tlakové změny v intervalech a měřené průtokové bilance byly využity pro výpočet koncentrace a bilance stopovače, výsledky pak byly aplikovány pro prediktivní model a optimalizaci nastavení parametrů zkoušky (Zuna et al. 2023).

V průběhu etapy 26 byly provedeny a vyhodnoceny tři stopovací zkoušky za použití konzervativních stopovačů KCl, KI a fluoresceinu o koncentracích 0,01 M KCl až 0,1 M KI. Laboratorní experimenty na přirozené puklině prokázaly konzervativní charakter těchto stopovačů (Zuna et al. 2022). Testovány byly intervaly vodivé (S31_2 do S36_3) a s méně vodivou poruchou (S31_1 do S36_3ab). Vzdálenost mezi průřezy puklin s vrty je zhruba 28 m, tj. dvakrát delší než vzdálenost průřežů v testu (S31_2 do S36_3).

Pro injektáž vody do intervalů byla využita aparatura (Obr. 51) vyvinutá v předešlých etapách projektu a na základě laboratorních zkoušek optimalizované měřicí systémy včetně průtočných cel (Zuna et al. 2020; Zuna et al. 2021). Pro injektáž konstantního průtoku byla s ohledem na parametry prostředí využita přesná HPLC pumpa (ECP201L). Vyšší průtoky než 1 l/min byly realizovány injektážním systémem, který tvořilo pístmembránové čerpadlo VERDER G13 (AxFlow), řízené frekvenčním měničem Danfoss pomocí Magneticko-induktivního senzoru proudění a pojistným ventilem. Měření tlaků bylo prováděno tlakovými čidly (JSP) se záznamem dat (Comet MS6). Tlaková čidla byla připojena na vstup měřeného intervalu a na ústí multipakru. Na vstupu i výstupech byly využity vyvinuté a optimalizované průtočné cely pro dané průtoky. Měření průtoků bylo zajištěno přesnými průtokoměry MIM 12 (Kobold) a ES Flow (Bronkhors), které byly před měřením testovány a kalibrovány v laboratoři. Způsob detekce byl závislý na zvoleném stopovači či jejich směsi (konduktometrie/EC, ISE elektrody I⁻, Br⁻, UV spektrometrie či

odběry vzorků roztoku (měřeno off site). Hydrochemická měření byla prováděna pomocí přístroje WTW 3630IDS s použitými sondami vodivost: WTW TetraCon925_P, ORP: WTW ORP T_900P, pH: WTW SenTix94X_P, O2: WTW FDO925_P.



Obr. 51 Stanoviště v ZK-2 při stopovací zkoušce

Na základě vyhodnocení hydraulických testů a prediktivních modelů byla v první etapě zkoušek zaměřena pozornost na aktivní zóny ve studovaných vrtech a vybraných intervalech.

Na základě hydraulických zkoušek byl navržen průběh zkoušek:

- před testem byl otevřen výstupní interval (OUT) – min. 3 dny dopředu pro ustálení tlakových podmínek (záznam ustáleného průtoku – OUT) + odběr podzemní vody ze studovaného intervalu pro test (dostatečný objem v závislosti na průtoku a době zkoušky);
- připojení řídicího a měřicích systémů a zahájení injektáže vody do intervalu IN – min. 24 hodin dopředu (ustálení podmínek proudění a tlaků) – vliv instrumentace apod. (záznam hodnot Q, tlak, koncentrace/vodivost – pozadové koncentrace);
- injektáž stopovače (stejný Q jako injektáž vody). Doba injektáže a koncentrace stopovače bude zvolena na základě předešlých testů a transportního modelu;
- proplach po testu (tzn. injektáž vody do vstupního intervalu-IN a s otevřeným výstupním intervalem-OUT) min. 48 hodin a následně ukončení zkoušky (dle průběhu průnikové křivky). Ideální doba je do poklesu koncentrace na hodnotu pozadí (dostatek zásobní vody);
- přirozený proplach – ponechání otevření výstupního intervalu – měření;
- otevření injektážního/popř. všech intervalů pro proplach celého systému – min. 1 týden (do dosažení koncentrace stopovače na úrovni pozadí – podzemní vody).

S ohledem na výraznou propojenost celého systému, velké objemy vody v intervalech aj., bylo nutné uvažovat riziko kontaminace vrtů použitými stopovači. Z tohoto důvodu by nebylo možné

použití radioaktivních stopovačů (pozn. použití radiostopovačů nebylo v popisu předmětu projektu dle smlouvy). S ohledem na délky intervalů a „mrtvé objemy“ je problematické vyčištění/proplach intervalů od použitých stopovačů. U většiny testů byl proplach intervalů časově náročný. Po testování transportu méně vodivé struktury (S31_1 – S36_3) probíhal výplach více jak 1,5 měsíce a následně byly otevřeny všechny intervaly pro „vyčištění“ celého systému.

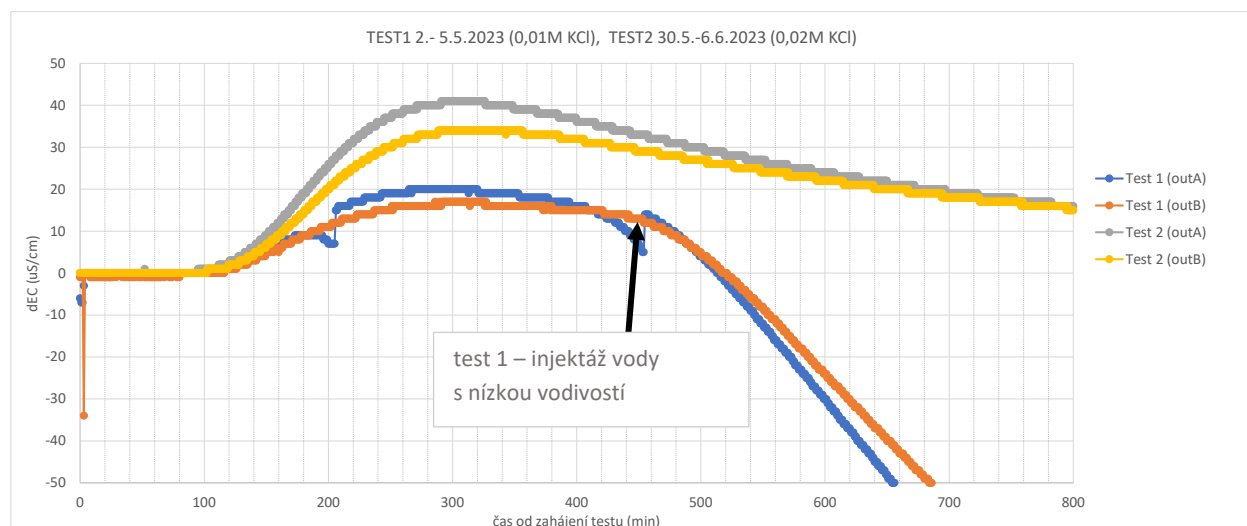
Pozornost byla dále zaměřena na rozdíly hydrochemických parametrů v jednotlivých studovaných intervalech především na hodnoty EC a pH, které mají vliv na chování stopovače a současně bilanci stopovače v případě využití solí (měření vodivosti). Při měření byly sledovány průtoky z jednotlivých intervalů a v průtočné cele měřeny hydrochemické parametry (EC, pH, Eh, LDO)

9.3 Vyhodnocení stopovacích zkoušek

Základní vyhodnocení stopovacích zkoušek zahrnuje především výpočet bilance stopovače a analýzu a kontrolu naměřených dat, které dále slouží jako podklad pro detailní hodnocení pomocí matematického modelu a stanovení transportních parametrů puklin (popsáno v následující kapitole 10). Detailní vyhodnocení testů je uvedeno v technické zprávě č. 5 (Zuna et al. 2023).

9.3.1 Hodnocení zkoušky 1 a 2

U obou realizovaných zkoušek 1 a 2 (se stejnou konfigurací vstupního a výstupního intervalu) byl stanoven stejný čas příchodu stopovače do výstupní měřicí cely cca 100 minut od zahájení injekce stopovače, viz průnikové křivky obou testů v Obr. 52. Maximální vodivost stopovače byla dosažena v čase cca 300 min, dvojnásobná hodnota při testu 2 odpovídá použité dvojnásobné vstupní koncentraci stopovače.

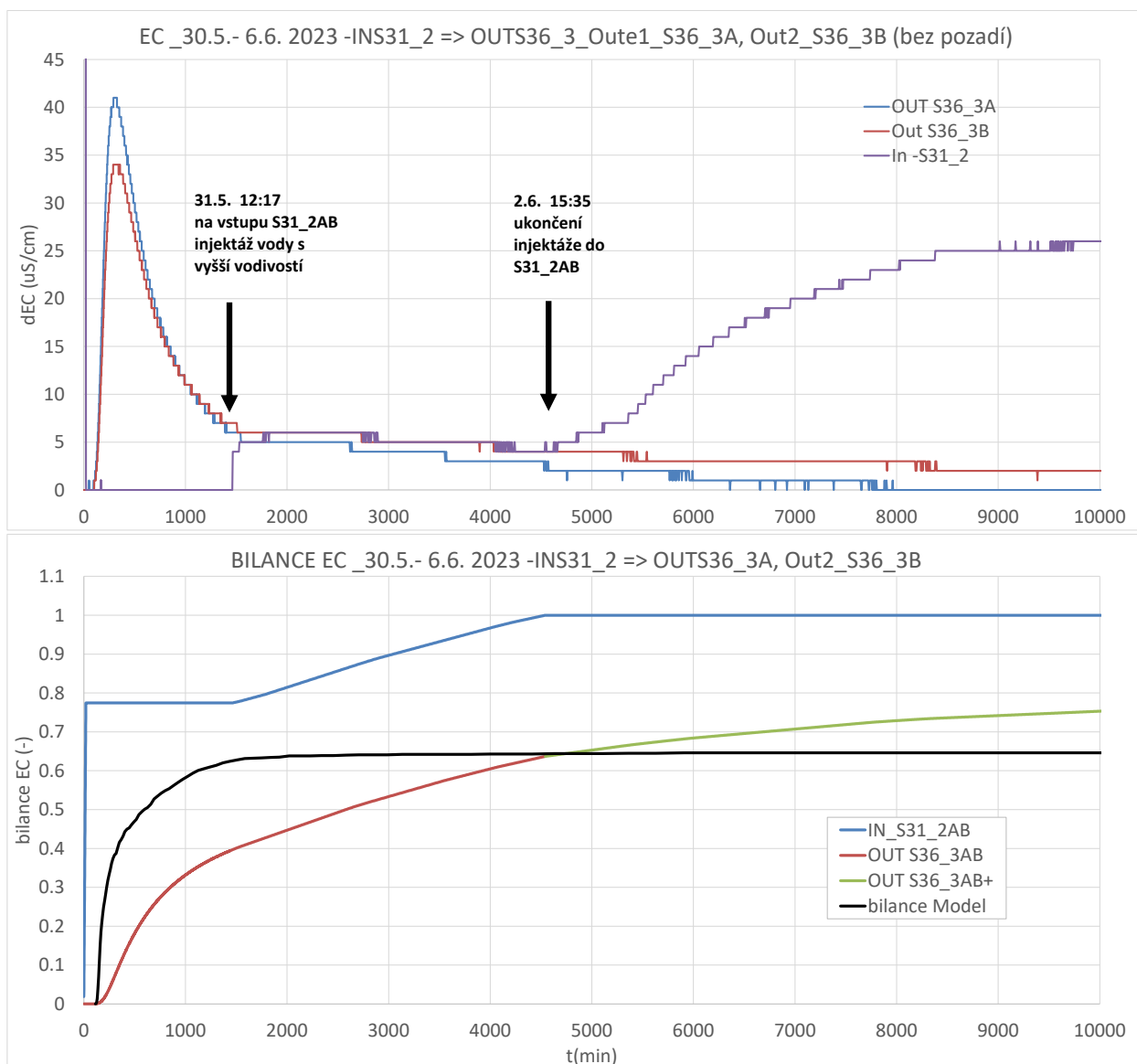


Obr. 52 Průniková křivka – testy 1 a 2 mezi intervaly S31_2ab a S36_3ab

V prediktivní simulaci v optimalizovaném modelu (transport byl počítán zjednodušeně metodou částic, ang. *particle tracking*) byla střední doba dotoku odpovídající maximální vodivosti vypočtena na 150 min, tj. poloviční doba, a měřený transport stopovače je pomalejší, zřejmě způsobený vyšším transportním rozevřením (pórovitostí pukliny). Podrobnější modelové hodnocení bylo zpracováno v rámci finalizace numerického modelu (kap. 10).

Výpočet celkové bilance stopovače (návratnosti) z průnikové křivky je důležitý pro hodnocení plošného rozsahu realizovaného experimentu a kalibračním parametrem pro ověření puklinové konektivity v dané oblasti řešení. Důležitou podmínkou pro správnou interpretaci výsledku stopovací zkoušky jsou jednoznačně definované a konstantní okrajové podmínky. Např. výpočet celkové bilance testu 1 byl komplikován malým objemem zásobní vody a použitím zcela odlišné vody s nízkou vodivostí pro injektáž od času 450 min. Výpočet celkové bilance obou testů byl dále komplikován rozdílnou konduktivitou vytékající podzemní vody z jednotlivých intervalů – na základě provedených měření se jedná o přirozenou „vlastnost“ zkoumaného bloku horniny, kdy z každého intervalu vrtu vytéká voda s jinou požadovou hodnotou konduktivity (u některých intervalů významně odlišnou). U vyhodnocení testu 2 bylo nutné zahrnout do výpočtu bilance vyšší konduktivitu injektované „čisté“ vody od času cca 1400 minut (viz Obr. 53). Na základě zkušeností byla provedena modifikace testu (vyšší objemy vody, využití jodidu apod.).

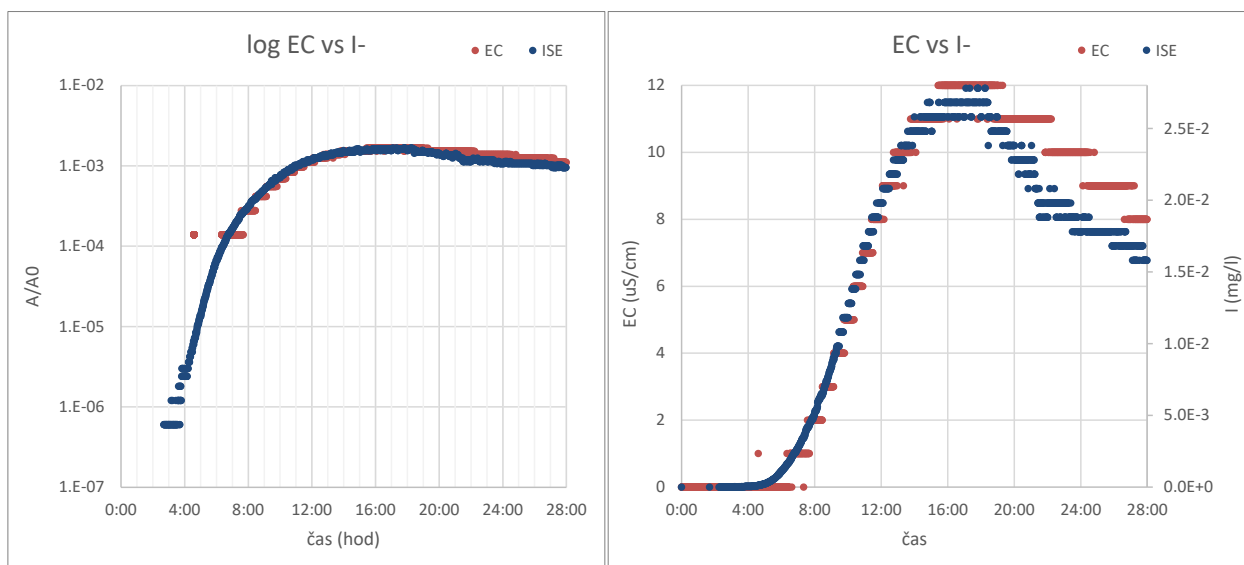
Vypočtené celkové množství stopovače, které oteklo z výstupního intervalu S36_3ab za celou dobu měření, bylo zhruba 75 % vstupní hodnoty. Výpočet bilance z hodnot konduktivity těsně nad pozadím (jednotky $\mu\text{S}/\text{cm}$) nicméně není přesný, je ovlivněn citlivostí a stabilitou měřících sond a je zatížen chybou, která může dosahovat několik jednotek až desítek procent. Orientačně se tedy přibližně 30–40 % stopovače nepodařilo bilančně „dohledat“ a zůstal částečně v systému propojených puklin v horninovém prostředí (v minimálních koncentracích) nebo částečně otekli do drenážního systému (v počvě přístupových chodeb).



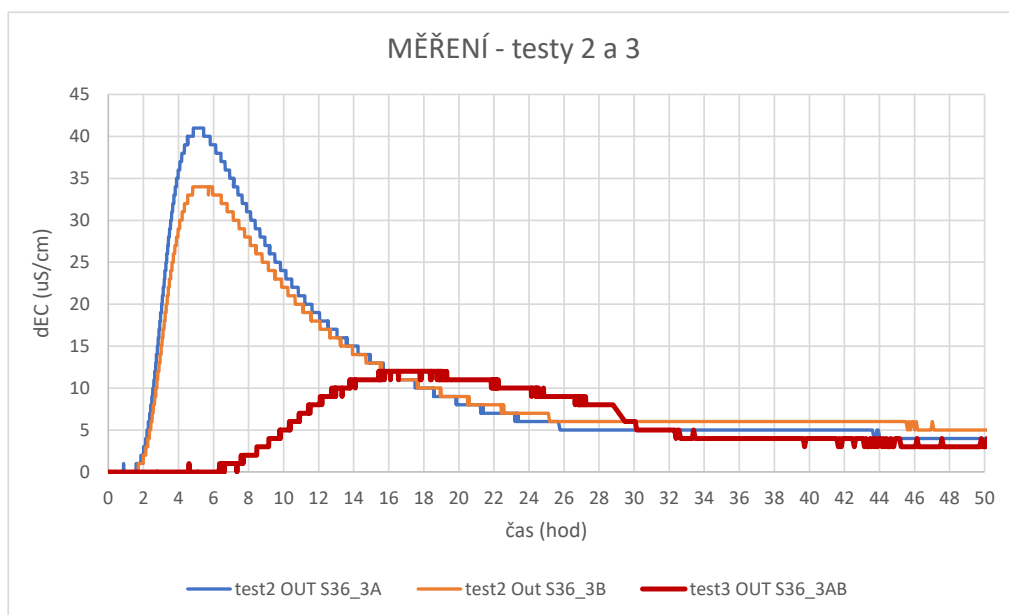
Obr. 53 Balance stopovače při testu 2 – nahoře průniková křivka v IN a OUT intervalech, dole součtový graf celkové bilance (v relativních jednotkách)

9.3.2 Hodnocení testu 3

Při testu 3 mezi intervaly S31_1 a S36_3ab byla kromě vodivosti měřena také přímo koncentrace jodidu pomocí přesnějších a citlivějších ISE sond, umožňující měřit minimální hodnoty o 2 řády nižší než WTW sondy měřící konduktivitu (EC), viz průniková křivka v Obr. 54. Současně byl minimalizován vliv odlišné vodivosti vody v jednotlivých intervalech (puklinových systémech). Dle záznamu ISE byl čas příchodu stopovače do výstupní měřící cely cca 3,5 hodiny od zahájení injektáže. Nárůst hodnot konduktivity ve výstupu byl zaznamenán až po cca 7 hodinách, průběh průnikové křivky EC nicméně odpovídá průběhu ISE. Maximální koncentrace stopovače byla dosažena v čase 17 hod, tj. po cca 3krát delší době než u testu 2 (porovnání v Obr. 55). Současně byly měřeny 3–4krát nižší hodnoty konduktivity než u testu 2.



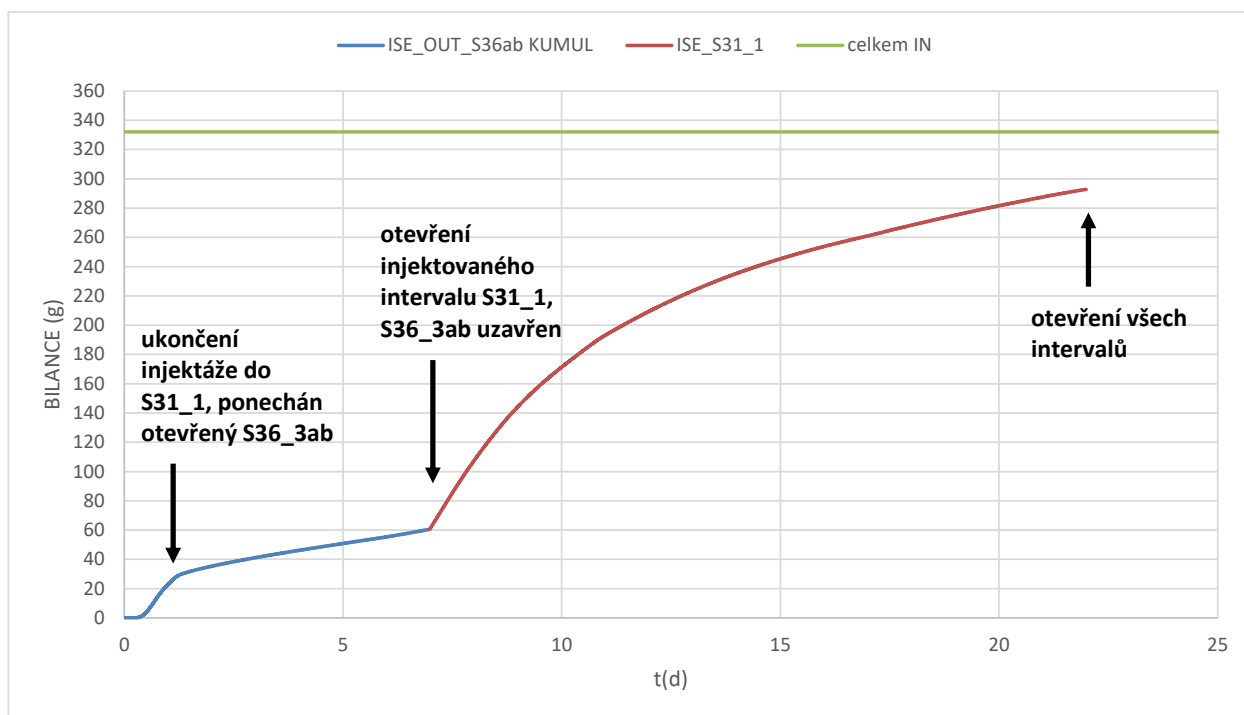
Obr. 54 Průniková křivka – test 3 mezi intervaly S31_1 a S36_3ab (vlevo relativní koncentrace a logaritmická škála, vpravo absolutní hodnoty)



Obr. 55 Průnikové křivky – testy 2 a 3

Čas maximální koncentrace stopovače dle prediktivní simulace transportu na optimalizovaném modelu byl opět zhruba poloviční, 8 hod. Podrobnější modelové hodnocení bylo zpracováno v rámci finalizace numerického modelu.

Celkové injektované množství jodidu v testu 3 bylo 332 g. Do výpočtu bilance (návratnosti) v grafu Obr. 56 je zahrnuto období celkem 22 dnů od zahájení experimentu – po dobu prvních 7 dní vytékal stopovač z výstupního S36_3ab v celkovém množství 60 g, tj. 18 %. Významně větší množství stopovače zůstalo v puklinovém systému, případně také ve volném objemu injektážního vrtu.



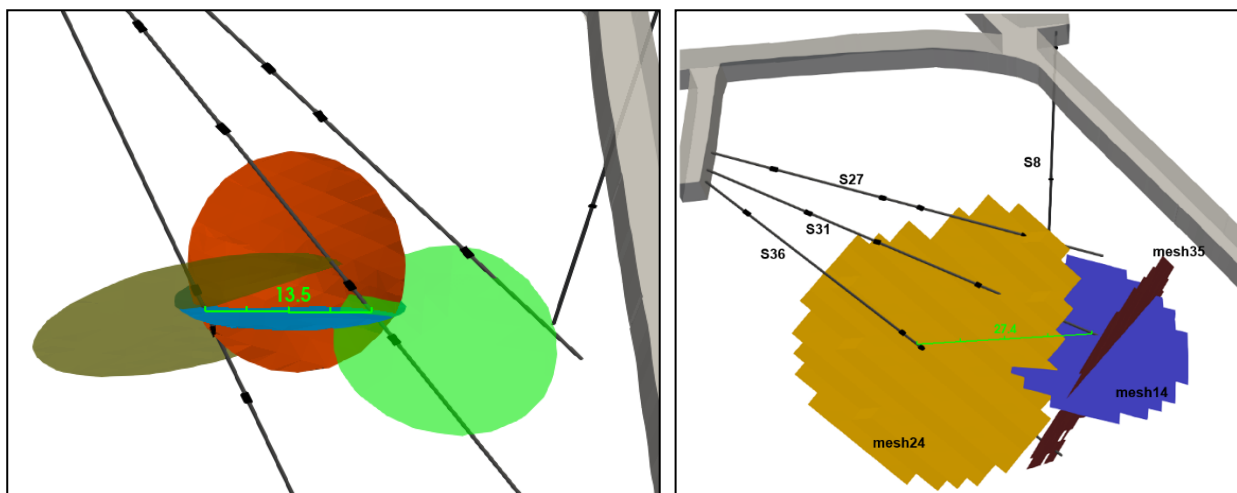
Obr. 56 Balance stopovače při testu 3 – součtový graf celkové balance stopovače I (v gramech)

10 Finalizace numerického modelu

Etapa finalizace numerického modelu (E27) navazuje na modelovací práce realizované v předchozích etapách 12, 21 a 24, které byly zaměřené na přípravu geometrie puklinové sítě a simulaci proudění. Cílem prací v etapě 27 bylo dopracování numerického modelu, ověření a aktualizace hydraulických parametrů a stanovení transportních parametrů konkrétních semi-deterministických puklin dle provedených stopovacích testů. Popis a hodnocení stopovacích zkoušek je detailně popsáno ve zprávě TZ 702/2023. Pro modelové vyhodnocení transportních parametrů puklin byly využity výstupy stopovacích testů č. 2 a 3, u obou testů byl jako konzervativní stopovač použit roztok KI:

- Stopovací zkouška 2 mezi intervaly IN S31_2ab → OUT S36_3a+3b (0,02M KI) – pro model byla použita průniková křivka EC, tj. měřené hodnoty konduktivity sondami WTW; současně byly sondou ISE měřeny i koncentrace KI, ale průniková křivka KI vykazovala časový posun vůči křivce EC, který nebyl objasněn.
- Stopovací zkouška 3 mezi intervaly IN S31_1 → OUT S36_3a+3b (0,1M KI) – s ohledem na velký volný objem intervalu S31_1 byla na základě prediktivního modelu použita 5krát vyšší koncentrace stopovače. Pro model byla použita průniková křivka koncentrace KI měřená novými sondami ISE, které mají významně vyšší citlivost (o 2 řády) než sondy WTW na měření konduktivity EC.

V sestaveném DFN modelu jsou intervaly S31_2 a S36_3 (stopovací zkouška č. 2) vzájemně propojeny jednou semi-deterministickou puklinou označenou „mesh24“, vzdálenost mezi průsečíky obou intervalů s puklinou je 13,5 m, viz Obr. 57 (vlevo). Propojení intervalů S31_1 a S36_3 (stopovací zkouška č. 3) je složitější – hlavní propojení mezi intervaly je přes dvojici puklin „mesh14“ a „mesh24“ (stejná puklina, která propojuje intervaly v testu 2), viz Obr. 57 (vpravo). Geometrie skutečného propojení bude ale s ohledem na délku intervalu a velký počet interpretovaných puklin komplikovanější (např. dle karotáže byly zjištěny další dva přítoky z puklin ve spodní části intervalu – „mesh29“ a „mesh35“, dle záznamu z ABI je v horní části intervalu řada významnějších poruch, ale bez přítoku). Nejkratší vzdálenost mezi průsečíky puklin s vrty je zhruba 28 m, tj. dvakrát delší než vzdálenost průsečíků v testu 2.



Obr. 57 Propojení testovaných intervalů semi-deterministickými puklinami – vlevo pro zkoušku č. 2 (IN_S31_2ab - OUT_S36_3ab), vpravo pro zkoušku č. 3 (IN_S31_1 - OUT_S36_3ab)

Pro tyto vybrané pukliny mesh14 a mesh24 byly na základě výsledků stopovacích zkoušek modelově hodnoceny a kalibrovány parametry transmisivity a transportního rozevření a hodnota podélné disperzivity (příčná disperzivity je 10 % z podélné). Pro konzervativní stopovač KI nebyly uvažovány a modelovány další transportní procesy (sorpce, difuze do horninové matrice). Vstupní hodnoty parametrů zadáných do transportního modelu vycházejí z předchozích prací – měření VTZ a sestavení optimalizovaného modelu – a jsou shrnuty v Tab. 18. Transportní rozevření a_T bylo vypočteno z hodnoty transmisivity T podle rovnice:

$$a_T = c \cdot T^{0,5},$$

kde hodnota parametru c je obvykle stanovena z experimentálních prací. Použitá hodnota 0,5 do výpočtu rozevření byla převzata z Crawford (2008).

Tab. 18 Vstupní parametry transmisivity a transportního rozevření zájmových puklin

Zdroj	Transmisivita pukliny (m ² /s)		Transportní rozevření (m)	
	mesh14	mesh24	mesh14	mesh24
VTZ intervalu v S31	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	0,00069	0,00059
VTZ intervalu v S36	x	$8,0 \cdot 10^{-7}$	x	0,00045
Optimalizovaný model v S31	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,00069	0,00084
Optimalizovaný model v S36	x	$1,6 \cdot 10^{-6}$	x	0,00063

Postup modelování stopovacích zkoušek a kalibrace transportních parametrů:

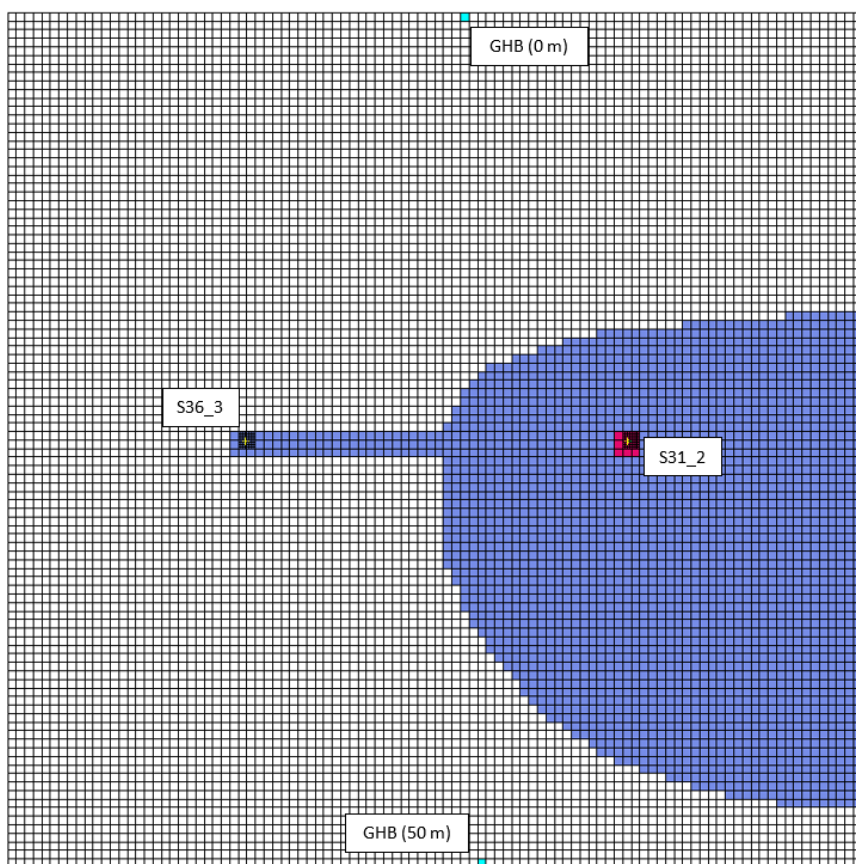
1. sestavení hydraulického modelu pro test 2, tj. s jednou zájmovou puklinou mesh24 a vstupními parametry z optimalizovaného modelu dle Tab. 18,
2. výpočet proudění v puklině a vyhodnocení tlaků, respektive odtoku pro 3 ustálené stavy – neovlivněný režim s uzavřenými kohouty v intervalech, ovlivněný režim při otevřeném intervalu S36_3ab a ovlivněný režim při stopovacím testu 2, tj. injektáž do S31_2ab, odtok z S36_3ab,
3. kalibrace transmisivity pukliny na hladinové a bilanční kritérium – odladění transmisivity na všechny 3 simulované stavy,
4. sestavení transportního modelu a simulace stopovací zkoušky 2 – zadávané hodnoty transportního rozevření jsou vypočteny z kalibrovaných hodnot transmisivity z bodu 3,
5. kalibrace transportního rozevření, respektive koeficientu c , a disperzivity – porovnání a fitování průběhu měřené a modelové průnikové křivky stopovače,
6. variantní simulace testu 2 s jiným prostorovým rozložením transmisivity a transportního rozevření – je opakován postup od sestavení modelu (bod 1) po kalibraci modelu a naladění parametrů (bod 5),
7. sestavení hydraulického modelu pro test 3, tj. se dvěma puklinami mesh14 a mesh24 – v puklině mesh24 byly zadány kalibrované hodnoty z bodu 3, v puklině mesh14 parametry transmisivity z optimalizovaného modelu dle Tab. 18,
8. výpočet proudění v puklině a vyhodnocení tlaků, respektive odtoku pro 3 ustálené stavy – neovlivněný režim s uzavřenými kohouty v intervalech, ovlivněný režim při otevřeném

- intervalu S36_3ab a ovlivněný režim při stopovacím testu 3, tj. injektáž do S31_1, odtok z S36_3ab,
9. kalibrace transmisivity pukliny na hladinové a bilanční kritérium – odladění transmisivity na všechny 3 simulované stavy,
 10. sestavení transportního modelu a simulace stopovací zkoušky 3 – zadány jsou transportní parametry – koeficient c a disperzivita – z kalibrovaného modelu předchozího testu 2 (bod 5),
 11. vyhodnocení průběhu měřené a modelové průnikové křivky stopovače a rekaliibrace transportního rozevření, respektive koeficientu c , a disperzivity,
 12. zhodnocení modelových výsledků.

10.1 Simulace stopovací zkoušky 2

10.1.1 Sestavení hydraulického modelu

Model stopovací zkoušky 2 vychází z geometrie puklin optimalizovaného modelu a je koncepčně řešen jako výřez z tohoto modelu – zahrnuje semi-deterministickou puklinu mesh24 o velikosti 30×30 m diskretizovanou do elementů o velikosti $0,3 \times 0,3$ m, respektive 1×1 m v závislosti na modelové variantě.



Obr. 58 Diskretizace modelové pukliny mesh24 do elementů $0,3 \times 0,3$ m – varianta se 3 zónami transmisivity a zjednodušeně zadaným preferenčním propojením mezi testovanými vrty

Ukázka diskretizace modelové pukliny mesh24 do elementů $0,3 \times 0,3$ m ve variantě se 2 zónami transmisivity a zjednodušeně zadaným preferenčním propojením mezi testovanými vrty S31 a

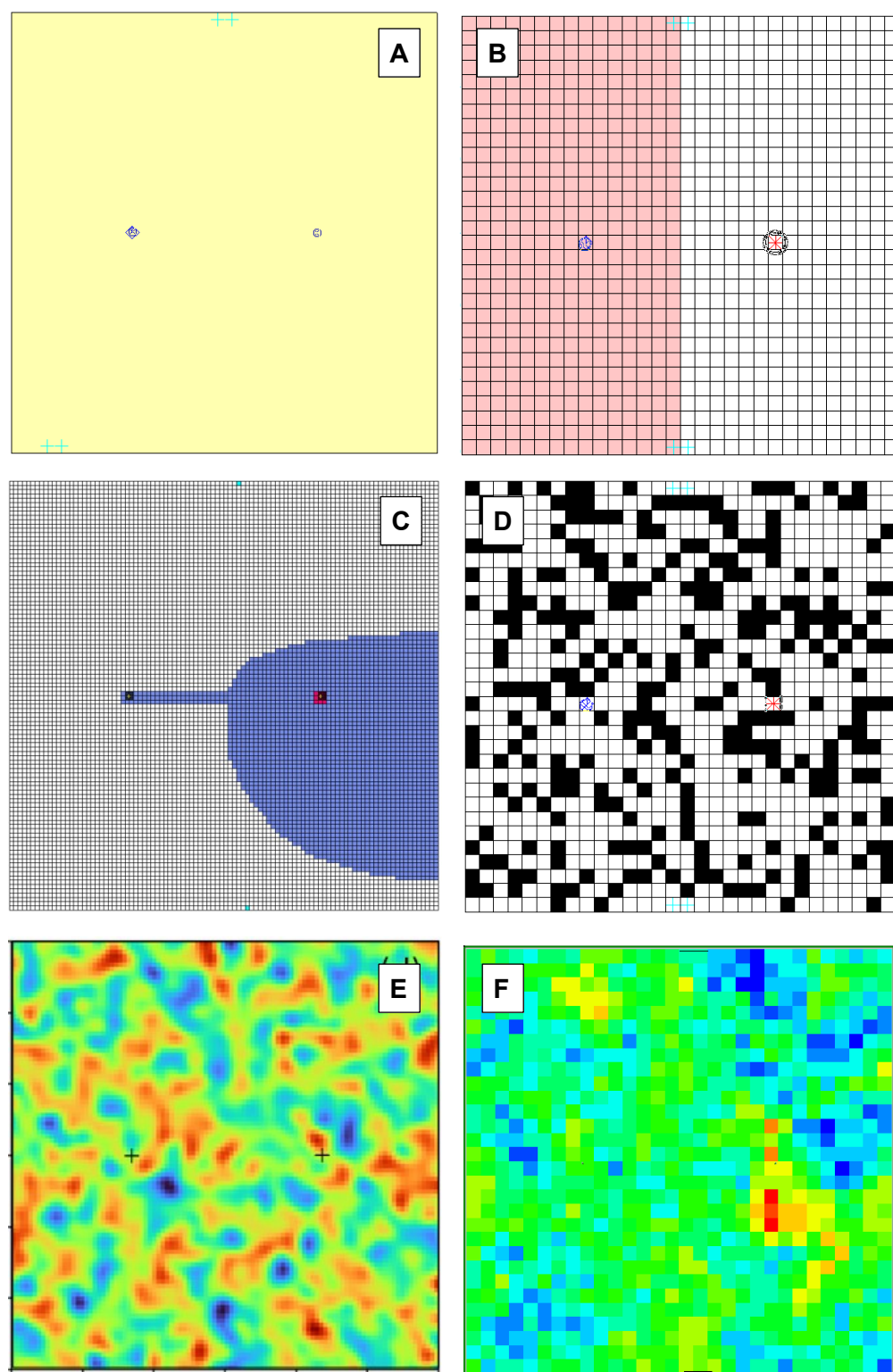
S36 je v Obr. 58. V obrázku jsou vyznačeny také zadané okrajové podmínky GHB (general head boundary) reprezentující napojení pukliny na okolní síť puklin.

10.1.2 Varianty plošného zadání parametrů

Pro zájmovou puklinu mesh24 jsou z měření k dispozici dvě hodnoty transmisivity vyhodnocené z VTZ ve vrtech S31 a S36. Skutečná prostorová variabilita hydraulických a transportních parametrů na puklině je nicméně velmi aktuální téma a věnuje se mu např. mezinárodní projekt GWFTS Task 10. V rámci modelového vyhodnocení stopovací zkoušky jsme se proto zaměřili také na různé varianty plošného zadání hodnot transmisivity a transportního rozevření do výpočetních elementů tvořících puklinu:

- A) jednoduchý homogenní model s jednou konstantní hodnotou v celé puklině,
- B) jednoduchý heterogenní model se dvěma hodnotami v celé puklině,
- C) jednoduchý heterogenní model se třemi hodnotami v celé puklině a preferenční cestou mezi průsečíky s vrty,
- D) homogenní model s jednou konstantní hodnotou v celé puklině, ale s podílem nepropustných NOFLOW elementů náhodně generovaných v prostoru (reprezentují sevřené plochy),
- E) heterogenní model s geostatisticky generovanou variabilitou v programu GSTools,
- F) heterogenní model s geostatisticky generovanou variabilitou v programu ConnectFlow.

Grafický přehled variant plošného zadání parametrů je v Obr. 59.



Obr. 59 Přehled variant plošného zadání parametrů v puklině

10.1.3 Simulace proudění a kalibrace modelu

Simulace proudění a navazujícího transportu byly realizovány v několika softwarech:

- proudění a transport v MODFLOW USG,
- proudění v MODFLOW2005, transport v MT3D-USGS, transport metodou particle trackingu v MODPATH7,
- proudění a transport metodou particle tracking v DFN modulu ConnectFlow.

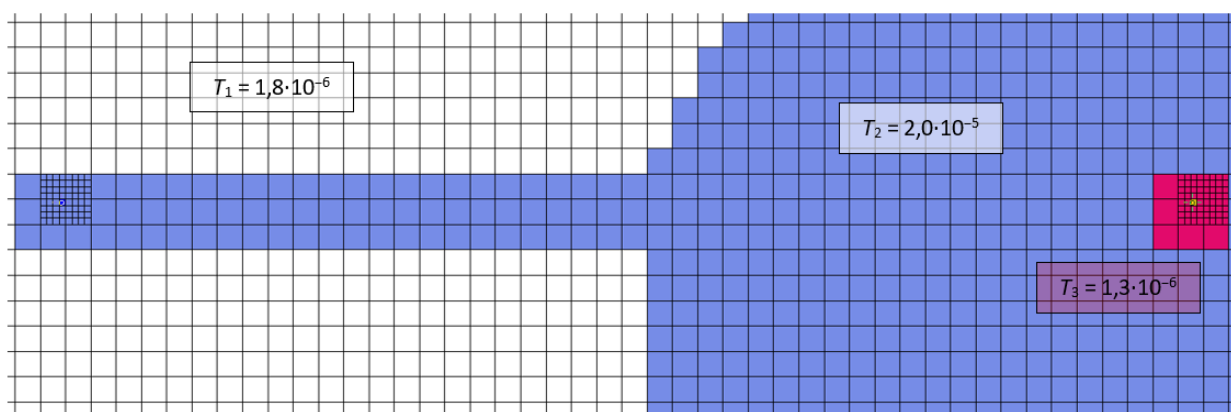
Jedním z „vedlejších“ cílů, proč byl tento test simulován ve více softwarech, bylo mimo jiné ověřit si možnosti těchto nástrojů na úloze, pro kterou jsou dostupná konkrétní a detailní měřená data (tj. ne pouze data převzatá z literatury, často neúplná). Aktuálně jsou pro SÚRAO řešeny úlohy s obdobnou náplní (např. validace modelu proudění a transportu v puklině v rámci GWFTS Task 10) a získané zkušenosti z tohoto projektu mají přesah a uplatnění i v jiných projektech a zakázkách zadavatele.

Kalibrace parametrů puklin je jedním z nejdůležitějších bodů v celém procesu modelování – kalibrované hodnoty parametrů (nebo rozsah hodnot) jsou následně extrapolovány do celé puklinové sítě a poskytují relevantní podklad pro přípravu transportního modelu (z transmisivity je počítáno transportní rozevření).

Model proudění byl kalibrován pro 3 ustálené stavy – neovlivněný režim s uzavřenými kohouty ve všech intervalech (A), ovlivněný režim při otevřeném intervalu S36_3ab (B) a ovlivněný režim při stopovacím testu 2, tj. injektáž do S31_2ab, odtok z S36_3ab (C). Přehled měřených a modelovaných hodnot tlaku a průtoku v úsecích S36_3 a S31_2 pro finální kalibrovaný stav varianty se 3 zónami transmisivity a zadaným preferenčním propojením mezi testovanými vrty je uveden v Tab. 19. V Obr. 60 jsou vykresleny kalibrované hodnoty transmisivity pro tuto variantu.

Tab. 19 Kalibrace modelu proudění ve variantě se 3 zónami transmisivity a zadaným preferenčním propojením mezi testovanými vrty – měřené a modelované hodnoty tlaku a průtoku v úsecích S36_3 a S31_2 v průběhu tří fází experimentu, tučně zvýrazněné hodnoty byly použity jako okrajové podmínky modelu proudění podzemní vody (v závorce u tlakové výšky je uveden měřený absolutní tlak)

Stav systému	S36_3 měřená	S36_3 modelovaná	S31_2 měřená	S31_2 modelovaná
A) Neovlivněná (hadičky zavřené)	$H = 25,0 \text{ m (504 kPa)}$	$H = 24,97 \text{ m}$ (rozdíl -0,12 %)	$H = 25,4 \text{ m (510 kPa)}$	$H = 25,33 \text{ m}$ (rozdíl -0,28 %)
	$Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$
B) Otevřený S36_3	$H = 8,2 \text{ m (336 kPa)}$	$H = 8,20 \text{ m}$	$H = 11,7 \text{ m (373 kPa)}$	$H = 11,57 \text{ m}$ (rozdíl -1,11 %)
	$Q = -1,42 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = -1,65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (rozdíl 16,20 %)	$Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$
C) Otevřený S36_3, injektáž do S31_2	$H = 17,7 \text{ m (431 kPa)}$	$H = 17,70 \text{ m}$	$H = 26,8 \text{ m (524 kPa)}$	$H = 26,82 \text{ m}$ (rozdíl 0,07 %)
	$Q = -2,02 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = -2,12 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (rozdíl 4,95 %)	$Q = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

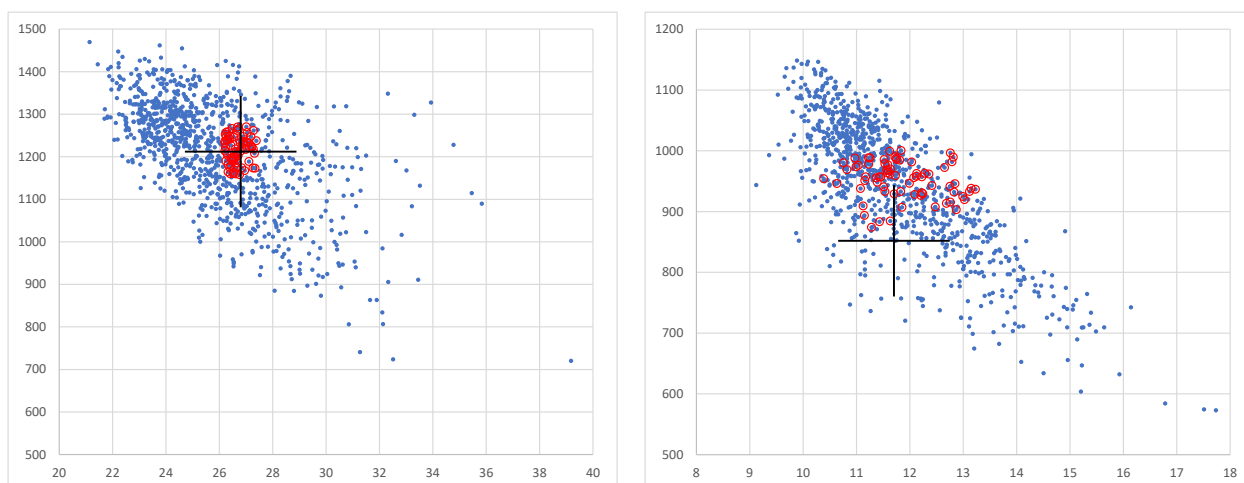


Obr. 60 Kalibrované hodnoty transmisivity – varianta se 3 zónami transmisivity a zadaným preferenčním propojením mezi testovanými vrty

10.1.4 Simulace transportu a kalibrace modelu

Základní metodou simulace transportu v puklinových sítích je particle tracking, který je implementován ve všech použitých softwarech, v případě DFN modelů (v ConnectFlow) je prakticky jedinou používanou metodou a zahrnuje pouze transport vlivem advekce. Zahrnutí dalších transportních procesů vyžaduje použití softwarů založených na CPM/ECPM konceptu (MT3D), případně jiných úzce specializovaných nástrojů.

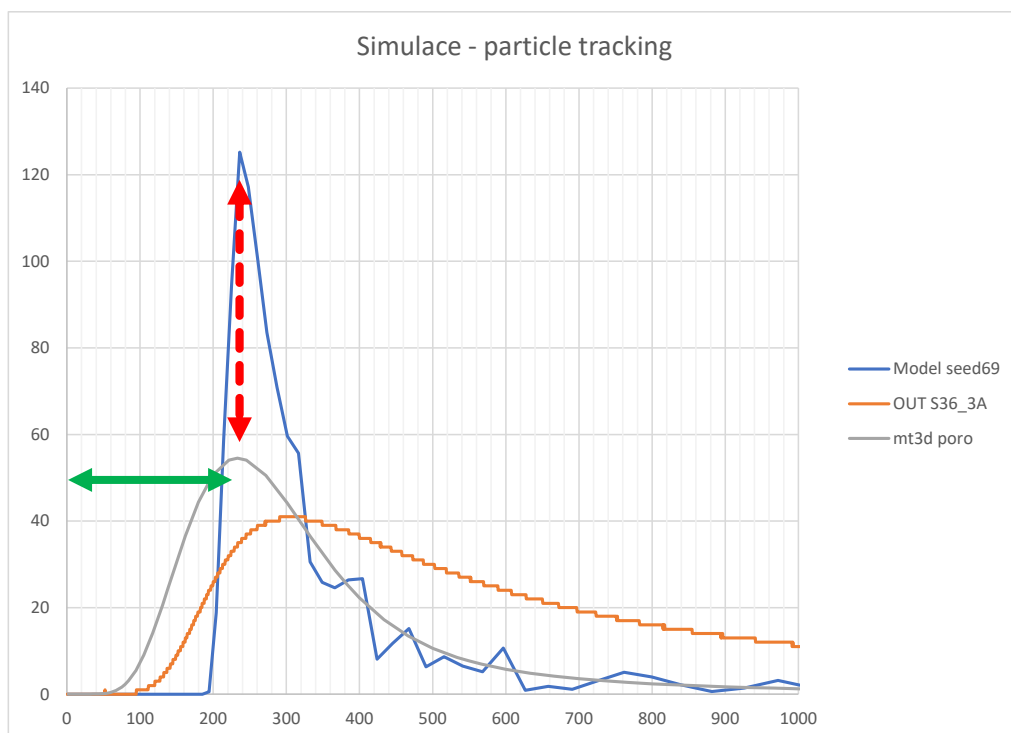
Realizace transportu metodou particle trackingu v DFN modelu je výpočetně výrazně méně náročná než kompletní transport řešený v CPM modelu. Např. program ConnectFlow umožňuje velmi rychle a efektivně realizovat velké množství stochastických simulací (viz Obr. 61), která jsou podkladem pro statistická hodnocení.



Obr. 61 Výstupy 1000 realizací modelu proudění (varianta F) při stopovacím testu 2 (vlevo) a otevření S36_3ab (vpravo). Červeně jsou zvýrazněny vybrané realizace, které ve zvoleném „malém“ rozsahu hodnot odpovídají měření (černý kříž)

Průnikovou křivku z particle trackingu (pokud zahrnuje pouze vliv advekce) lze s výpočtem pomocí plného transportu (se zahrnutím dalších procesů, u konzervativních stopovačů především disperze) vzájemně srovnávat na časové ose v dosažení píku koncentrací. Z realizovaných

porovnání v různých softwarech a na různých variantách plošného rozdělení parametrů bylo ověřeno, že obě metody poskytují stejný výsledek, viz Obr. 62, kde je píku koncentrací u obou modelů dosaženo v čase 240 minut. Naměřené hodnoty píku v čase 300 minut (viz oranžová průniková křivka) lze dosáhnout kalibrací modelu – konkrétně transportního rozevření, respektive koeficientu c , který lze kalibrovat oběma metodami výpočtu (efektivněji a rychleji metodou particle tracking). Rozdíl v hodnotách maxim koncentrací je způsoben disperzí stopovače v puklině, která není v particle trackingu ConnectFlow, ani MODFPATH zahrnuta, a musí být kalibrována výpočtem plného transportu v jiném softwaru – MT3D.



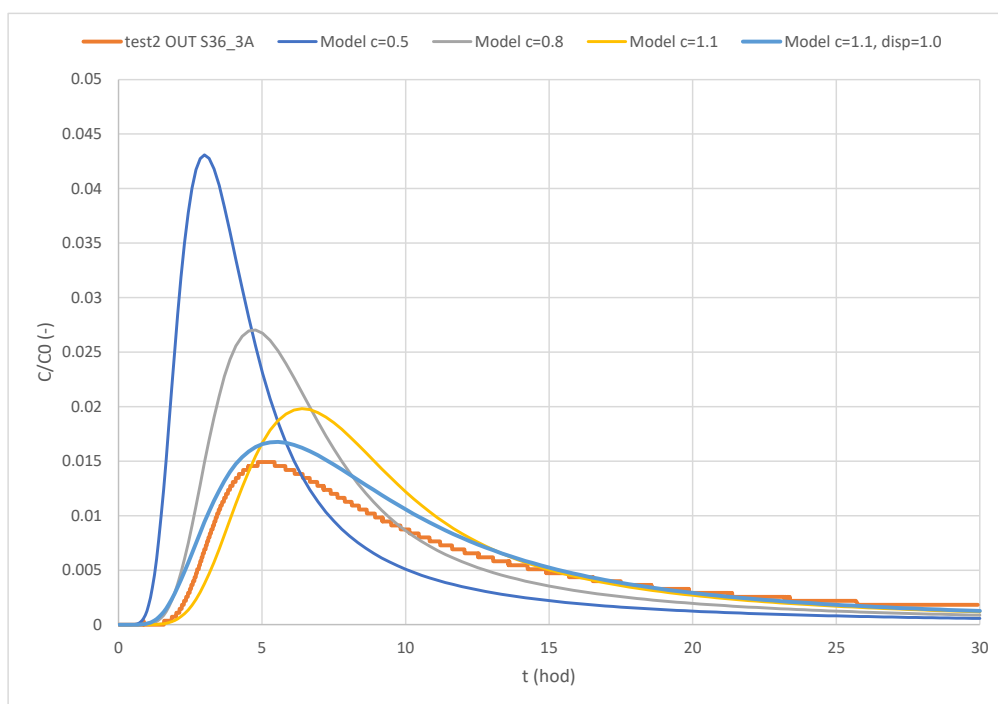
Obr. 62 Porovnání průnikových křivek – nekalibrovaná realizace s geostatisticky generovanou variabilitou (F , seed69) – výpočet transportu metodou particle tracking v ConnectFlow a plného transportu v MT3D. Zelenou šipkou je zvýrazněn stejný čas v dosažení „píku“ koncentrací, červenou šipkou zvýrazněn rozdíl maxim vlivem disperze stopovače v puklině

Důležitým výstupem modelování (i v návaznosti na další řešené projekty) je zjištění, že naměřenou průnikovou křivku stopovací zkoušky 2 bylo možné nakalibrovat ve všech simulovaných variantách plošného rozložení parametrů A až F, tj. od nejjednodušší homogenní varianty až po nejsložitější geostatisticky generované parametry ve více realizacích. To by v důsledku znamenalo (pokud by se to potvrdilo na případných dalších experimentech), že heterogenita parametrů na úrovni pukliny (její výzkum je velmi komplikovaný) není pro modelování proudění a transportu v puklinových sítích tolik důležitá a lze ji nahradit jednoduššími parametry. V Tab. 20 jsou shrnuty kalibrované hodnoty parametrů puklin pro jednotlivé varianty modelů. U hodnot disperzivity je započtený vliv numerické disperze, která má velikost poloviny rozměru výpočetního elementu. Grafické porovnání měřených a modelových průnikových křivek je uvedeno v Obr. 63 až Obr. 66.

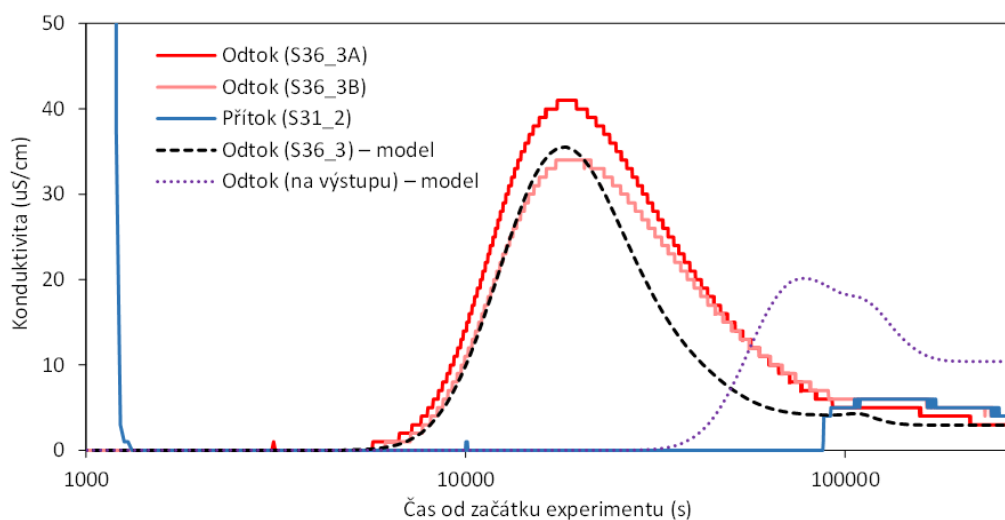
Tab. 20 Přehled kalibrovaných hodnot parametrů pukliny mesh24 pro jednotlivé modelové varianty

Varianta	transmisivita (m ² /s)	koeficient c	disperzivita* (m)
A	$4,6 \cdot 10^{-6}$	1,1	1,5
B	$3,2 \cdot 10^{-6}$ – $5,6 \cdot 10^{-6}$		
C	$1,3 \cdot 10^{-6}$ – $2,0 \cdot 10^{-5}$	0,9	0,6
D	$3,0 \cdot 10^{-5}$	1,1	1,0
E	$2,0 \cdot 10^{-6}$ (střední hodnota)	0,7	1,6
F	$4,7 \cdot 10^{-6}$ (střední hodnota)	0,5 (seed139)	

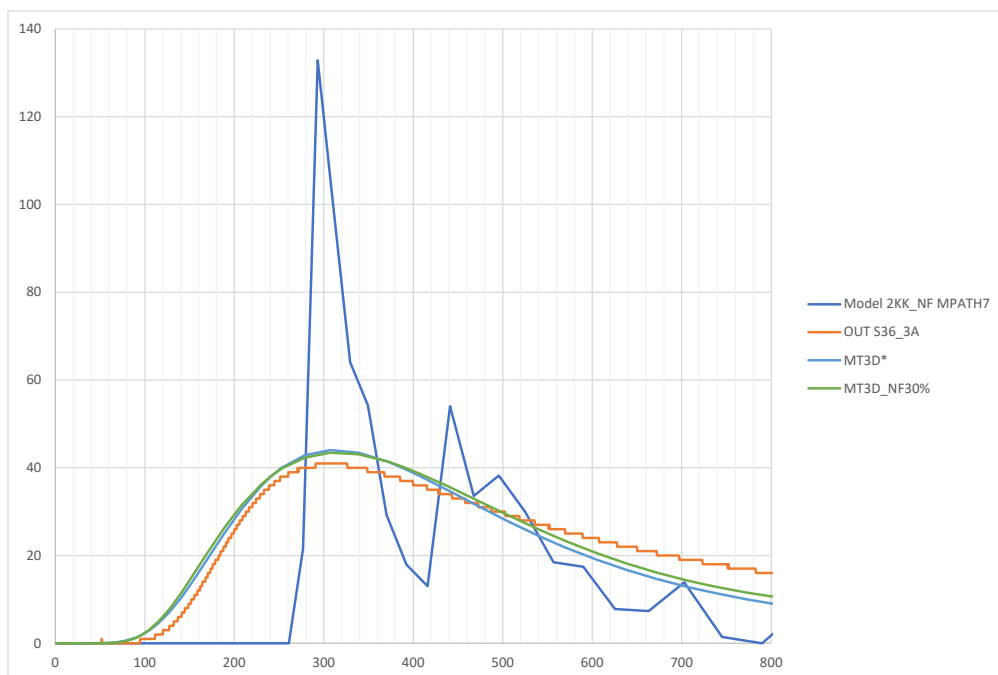
*celková disperze, tj. součet zadané hodnoty a numerické disperze



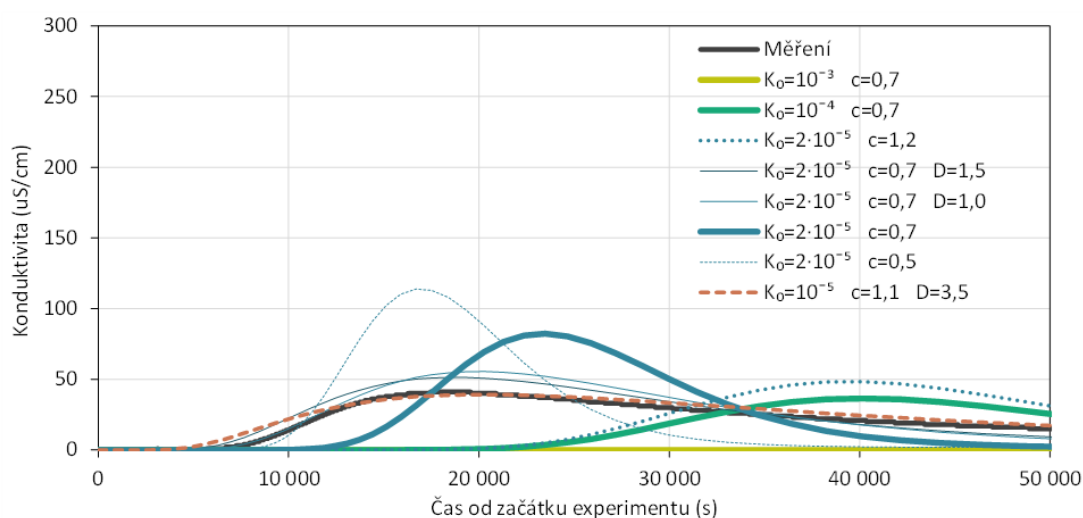
Obr. 63 Porovnání průnikových křivek – homogenní model s jednou hodnotou (varianta A) – výpočet plného transportu v MT3D pro různé parametry koeficientu c a disperzivity



Obr. 64 Porovnání průnikových křivek – kalibrovaný heterogenní model s 3 hodnotami (varianta C) – výpočet plného transportu v MODFLOW USG



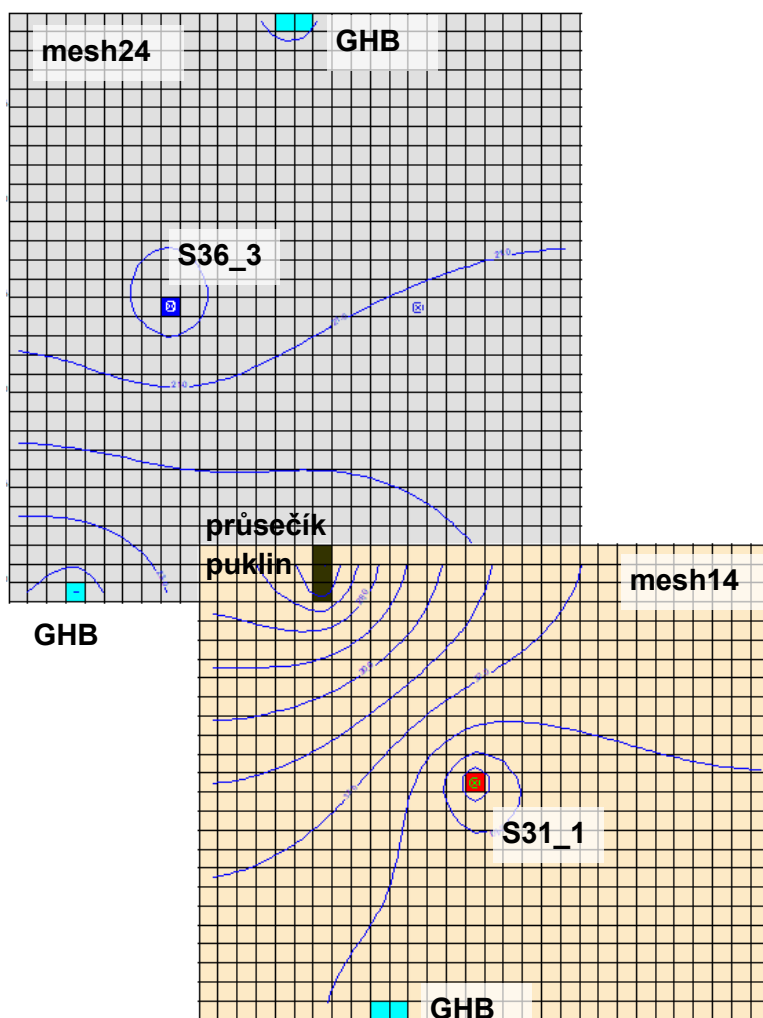
Obr. 65 Porovnání průnikových křivek – kalibrovaný homogenní model s podílem nepropustných NOFLOW elementů (varianta D) – výpočet transportu metodou particle tracking v MODPATH a plného transportu v MT3D



Obr. 66 Porovnání průnikových křivek – heterogenní model s geostatisticky generovanými parametry v GStools (varianta F) – výpočet plného transportu v MT3D pro různé parametry koeficientu c a disperzivity

10.2 Simulace stopovací zkoušky 3

Koncepčně je model stopovací zkoušky 3 řešen analogicky předchozímu modelu zkoušky 2. Geometrie puklin vychází z optimalizovaného modelu a je sestavena jako výřez z tohoto modelu – zahrnuje semi-deterministické pukliny mesh24 a mesh14 diskretizované do elementů o velikosti 1×1 m, viz Obr. 68. V obrázku jsou vyznačeny také průsečíky s vrty S31 a S36, vzájemný průsečík puklin a zadané okrajové podmínky GHB (general head boundary) reprezentující napojení pukliny na okolní síť puklin.



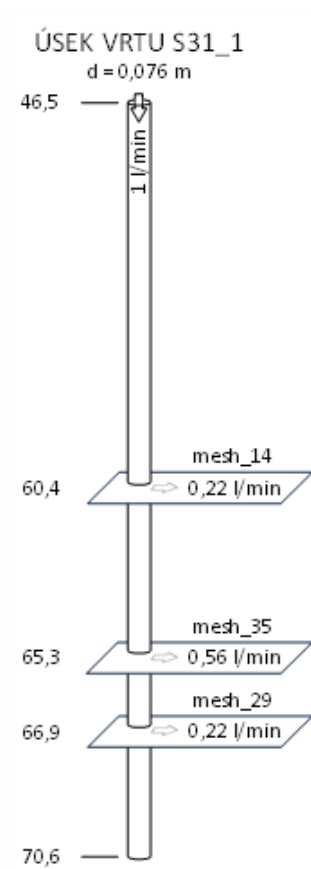
Obr. 67 Diskretizace modelových puklin mesh14 a mesh24 do elementů 1×1 m, vyznačení vrtů, průsečíku puklin a okrajových podmínek (GHB). Vykresleny jsou také modelové izolinie hydraulické výšky

Schéma injektážního úseku S31_1 s průsečíky puklin z geometrického modelu je znázorněno v Obr. 68. Vstupní úsek pro test 3 je komplikovanější než u testu 2 a významněji ovlivňuje zadání vstupního pulzu stopovače a vyhodnocení transportních parametrů, kalibraci modelu atd.:

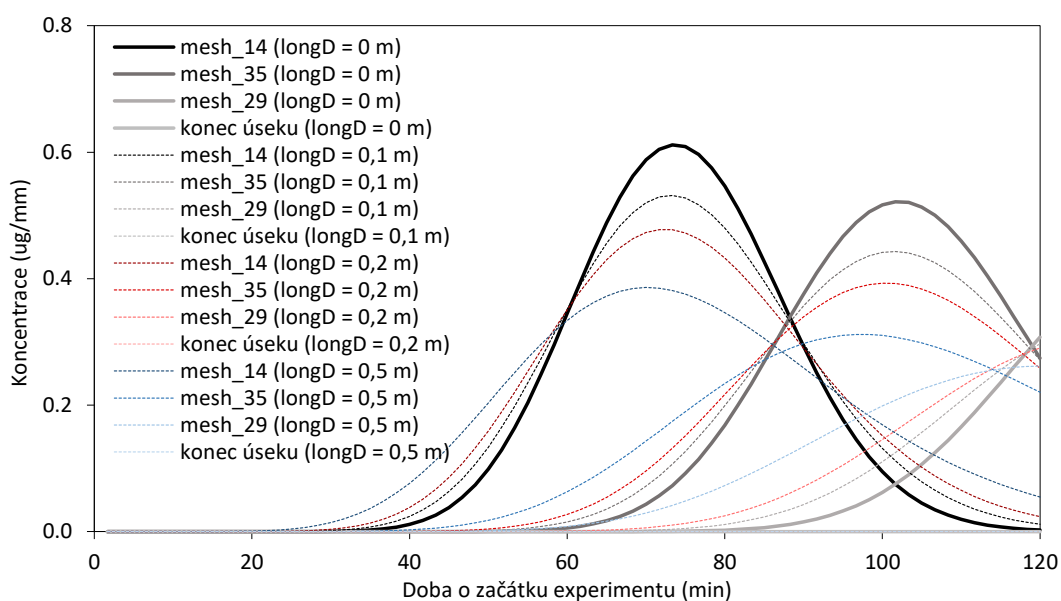
- volný objem ve vrtu (109 l) je zhruba 5× větší než injektovaný objem stopovače (20 l) – dochází tedy k významnému ředění a zpomalení pohybu stopovače již před vstupem do pukliny,
- dle výsledků karotáže jsou v úseku 3 pukliny s přítoky (detailní VTZ na odpovídajících menších úsecích vrtu, které by propustné pukliny/zóny upřesnily, nebyly realizovány) – v modelu předpokládáme, že při testu dojde k rozdělení injektovaného množství stopovače do těchto 3 puklin v poměru měřených přítoků do vrtu, tj. 22 % do pukliny mesh14.

Pomocí 1D modelu vrtného úseku S31_1 byla simulována injektáž 20 min pulzu stopovače a byl vyhodnocen průběh pulzu (průniková křivka) v místě průsečíku s puklinou mesh14, viz Obr. 69. Modifikace pulzu byla simulována pro hodnoty disperzivity v rozsahu 0–0,5 m – zpoždění vstupu

stopovače do pukliny mesh14 je zhruba 40 min, maximum pulzu klesá na méně než 40 % injektované hodnoty a délka pulzu se rozšiřuje na cca 100 min.



Obr. 68 Schéma injektážního úseku S31_1 s vymezením předpokládaných vodivých puklin dle karotáže



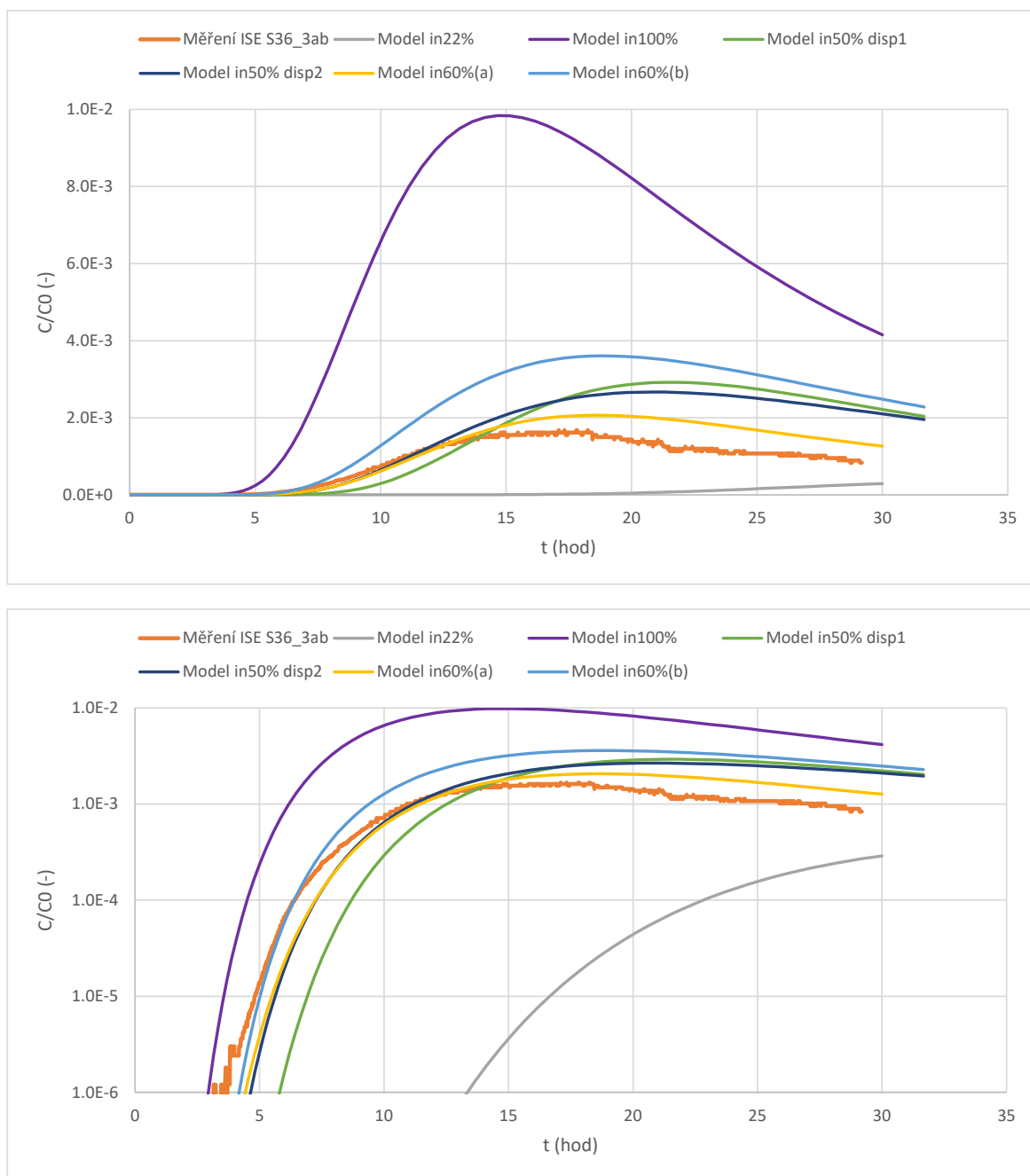
Obr. 69 Modelované průnikové křivky v úseku S31_1 v úrovni jednotlivých průsečíků puklin – pro různé hodnoty podélné disperzivity

10.2.1 Kalibrace modelu

Na základě výše uvedených předpokladů byl nejdříve sestaven a kalibrován model proudění pro všechny 3 stavy systému (neovlivněný stav, otevřený úsek S36_3ab a injektáž při zkoušce 3). Simulace zkoušky 3 byla provedena pro homogenní variantu transmisivity v ploše pukliny – parametry pro puklinu mesh24 byly zadány z kalibrovaného modelu zkoušky 2. Simulace byly realizovány v programu MODFLOW/MT3D.

Po kalibraci hydraulického modelu byl simulován transport stopovače s nastavením koeficientu c a disperzivity ze simulace testu 2, zhodnoceny výsledky (porovnáním měřené a modelové průnikové křivky) a provedena úprava modelu s cílem kalibrovat parametry pukliny mesh14:

- průnikové křivky pro vybrané modely jsou vykresleny v grafu v Obr. 70,
- pro základní model „in22%“ s nastavením injektáže do pukliny mesh14 na předpokládané úrovni 22 % (dle karotáže) je transport stopovače významně pomalejší – v intervalu S36_3 se objevuje až po 14 hodinách, tj. o více než 10 hodin později, než bylo naměřeno, a celkově v nižších koncentracích,
- úpravou parametrů disperze nebo transportního rozevření nebylo možné tento model (in22%) úspěšně nakalibrovat,
- rychlejšího transportu a zvýšení balance stopovače na výstupu lze v modelu dosáhnout zvýšením injektovaného množství vody do pukliny mesh14, tzn. jiným přerozdělením přítoku mezi 3 pukliny (které nebude odpovídat hodnotám z karotáže),
- modelově byly testovány hodnoty přítoku do pukliny mesh14 při injektáži 50 % (tj. 500 ml), 60 % (600 ml) a 100 % (tj. hypotetická varianta jen s propustnou mesh14) – všechny tyto modely byly nejdříve nakalibrovány po hydraulické stránce (model proudění) a následně simulován transport s hodnotami disperzivity 1,0 m a koeficientem $c = 1,1$ (kalibrované v rámci simulace testu 2), případně byly provedeny další dílčí úpravy modelu,
- u modelu se zadaným podílem 50 % injektovaného množství do mesh14 odpovídá měřené průnikové křivce lépe model s vyšší disperzivitou 2 m – větší vliv disperze v tomto případě nemusí nutně znamenat vyšší disperzi v puklině, ale vzhledem k poměrně velkým vstupním nejistotám to může znamenat také větší disperzi, případně ředění v objemu vrtu,
- u modelu se zadaným podílem 60 % odpovídá měřené průnikové křivce poměrně dobře i zadaná disperzivita 1 m, lepší shody bylo dále dosaženo snížením koncentrace stopovače na vstupu do pukliny na 30 % původní hodnoty (viz model „in60%(a)“ v grafu), které by odpovídalo vyšší disperzi při průchodu stopovače intervalem S31_1.



Obr. 70 Stopovací zkouška 3 - modelové průnikové křivky pro různá nastavení zdrojového pulzu (v horním grafu lineární měřítko koncentrace, ve spodním logaritmické)

10.3 Shrnutí výsledků

V rámci etapy finalizace numerického modelu (etapa 27), byly modelovací práce zaměřené na simulace provedených stopovacích zkoušek a vyhodnocení transportních parametrů konkrétních puklin semi-deterministického HydroDFN modelu připraveného v předchozích etapách. Přehled získaných poznatků je shrnut v následujících bodech:

- vyhodnocení transportního experimentu je ovlivněno nejistotami v geometrii úlohy, hydraulickém popisu (okrajových podmínkách) a instrumentaci experimentu – cílem prací v předchozích etapách projektu (laboratorních, monitorovacích, modelovacích atd.) bylo tyto vstupní nejistoty minimalizovat. Poměrně dobře se to podařilo u zkoušky 2 – jedním z problémů při realizaci zkoušky byla jen kratší doba injektáže, po kterou byly zajištěny ustálené podmínky, a nebylo tedy možné vyhodnotit celkovou bilanci stopovače. U zkoušky 3 bylo vstupních nejistot více, předem sice byly známy, ale bohužel jiná konfigurace testu nebyla možná – příliš dlouhý injektážní úsek vrtu (a bez výplně pro snížení volného objemu) s větším počtem puklin, detailní pilotní VTZ a tedy pouze neověřené vodivé pukliny/zóny. Větší počet vstupních nejistot různého typu představuje mnoho stupňů volnosti už ve fázi sestavení modelu, vyhodnocení transportních parametrů je pak komplikované a výstupy zkreslené nepřesnostmi v samotném zadání,
- realizované modely stopovacích zkoušek zahrnovaly pouze zájmové pukliny mezi testovanými intervaly, tj. představovaly výřez HydroDFN modelu – propojení na okolní pukliny bylo zadáno koncepčně jako okrajová podmínka GHB (se zadanou hydraulickou výškou a odporovým koeficientem) – výsledky hydraulických simulací a úspěšná kalibrace na měřené hodnoty potvrdily možnost využít tohoto zjednodušeného zadání pro řešení parametrů konkrétních puklin,
- detailní měření rozevření puklin na malých vzorcích pomocí skenování povrchů poukazuje na velkou variabilitu hodnot rozevření (např. GWFTS Task 10) – otázkou je extrapolace této heterogenity do měřítka skutečné pukliny a její vliv na výsledky proudění a transportu stopovače mezi dvěma vrty na vzdálenost několika jednotek až desítek metrů. Simulovány byly proto různé přístupy generování transmisivity a transportního rozevření v ploše pukliny – s homogenním (jedna hodnota) i vysoce heterogenním rozložením (geostatisticky generovaný rozsah hodnot) – přičemž výsledky simulací stopovací zkoušky 2 ukázaly, že je možné kalibrovat modelové parametry pro všechny zvolené přístupy,
- kalibrované hodnoty transmisivity pukliny (mesh24 pro stopovací zkoušku 2) se dle varianty plošného rozložení mírně liší a jsou v rozsahu $2,0$ až $4,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. U varianty homogenního rozložení s heterogenitou generovanou NOFLOW elementy (přístup používaný v modelech finské Posiva) je kalibrovaná transmisivita ještě téměř o řád vyšší $3,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Ve všech modelových variantách jsou tedy kalibrované hodnoty vyšší než měřené hodnoty z VTZ (přesněji vypočtené z VTZ), které by měly být jako vstupy v nekalibrovaných používány velmi opatrně,
- chybně zadaná transmisivita pukliny v modelu ovlivňuje následně i výpočet transportu, protože transportní rozevření puklin je obvykle vypočteno pomocí mocninné funkce právě z hodnoty transmisivity. Dalším parametrem, který vstupuje do výpočtu transportního rozevření je koeficient úměrnosti c , který se obvykle uvažuje hodnotou $0,5$. V rámci vícenásobných realizací (1000) v programu ConnectFlow bylo nalezeno optimální řešení transportu (odpovídající měřené průnikové křivce) i pro tuto hodnotu $0,5$. Pro homogenní varianty nebo s menší heterogenitou byla hodnota koeficientu c kalibrována v rozsahu $0,9$ až $1,1$,
- kombinace vyšších kalibrovaných hodnot transmisivity a koeficientu c znamená celkově vyšší transportní rozevření a tím i větší objem vody, který se v puklinách nachází a ve kterém se stopovač ředí. Pro velikost pukliny $30 \times 30 \text{ m}$, transmisivitu dle VTZ a $c = 0,5$ je objem vody v puklině $0,5 \text{ m}^3$. Pro kalibrovanou transmisivitu 4krát větší a koeficient $c = 1,1$ je objem vody v puklině $2,1 \text{ m}^3$,

- poměrně důležitým poznatkem také je, že ve všech modelech bylo potřeba zadat nenulovou hodnotu disperze, tj. i v modelech se zadanou velkou plošnou heterogenitou, u kterých jsme předpokládali, že generované preferenční zóny vliv disperze nahradí – zde je ale velký prostor pro testování transportních modelů, geostatistických metod generování je větší množství,
- porovnání průnikových křivek z výpočtu transportu metodou particle trackingu (pouze advekce, 1D trajektorie) a plného transportu (advekce a disperze ve 2D síti) ukázalo srovnatelnost výsledků, respektive byly vypočteny stejné střední doby dotoku stopovače (čas maximální koncentrace) – metoda particle trackingu je tak díky své rychlosti výpočtu velmi efektivním nástrojem pro základní hodnocení transportu.

11 Závěr

Při realizaci projektu byly naplněny vytyčené cíle (kap.1.1) a byla získána celá řada poznatků a zkušeností, které je možné využít pro další studium či následující experimenty. Hlavní zkušenosti, doporučení a návrhy jsou uvedeny níže (kap.11.1–11.2).

11.1 Shrnutí zkušeností a doporučení

Metody měření orientace a zhodnocení vlastností puklin a jejich omezení:

Měření na stěnách PVP

Tato metoda se zaměřuje na mapování puklin na exponovaných stěnách podzemních prostor (chodeb). Výhodou je přímý přístup k horninovému masivu a možnost detailního pozorování puklin. Nevýhodou je nemožnost měřit subhorizontální pukliny a pukliny paralelní s chodbou.

Měření na vrtném jádře

Tato metoda se zaměřuje na analýzu puklin v horninových vzorcích odebraných vrtáním. Umožňuje měřit orientaci a vlastnosti puklin v hloubce. Nevýhodou je zanedbání puklin, které jsou paralelní s osou vrtu. Měření sklonu a azimutu puklin je možné pouze na orientovaném vrtném jádře, zpětná reorientace jádra je i s využitím karotážních dat a jejich skenu vysoce nepřesná. Strukturní charakterizace vrtného jádra, včetně výplně, mocnosti a charakteru puklin, je nicméně nezbytná pro komplexní analýzu horninového masivu, včetně navazujících laboratorních testů výplně a určení charakteru mineralizace, např. tektonických poruch.

Akustický (ABI) a optický televizor (OBI)

Tato karotážní metoda, využívající akustické vlny k mapování vnitřní struktury vrtu, umožňuje získat detailní obraz puklin a dalších struktur ve vrtu. Díky možnosti měření rozevření puklin lze získat indicie o jejich potenciálním otevření, či naopak sevření. Nevýhodou je nemožnost odlišit subparalelní pukliny od foliací a ztížená interpretace dat způsobená vysokou četností foliací (typicky pro metamorfované horniny). Data z akustického televizoru rovněž nezobrazují reálný vzhled horninového masivu a je třeba je kombinovat s optickým televizorem. Metoda OBI (rozvinutý televizní obraz) umožňuje detailnější hodnocení tektonických poruch ve srovnání s metodou ABI40. Využití akustického televizoru je vhodné zejména v zakalené vodě, kde špatná viditelnost neumožňuje získat kvalitní obraz stěny vrtu pomocí optického televizoru. Obě metody se vzájemně dobře doplňují.

Orientace a sklon vrtu

Přesná znalost orientace vrtu (azimut a sklon) je klíčová pro správné vyhodnocení karotážních dat, včetně dat akustického televizoru. Při sklonu vrtu menším než 50° od horizontály může docházet k nechtěnému pootočení sondy ABI40, což vede k nepřesným datům o orientaci puklin (korekce).

Srovnání dat a výstup v podobě vrtné kolonky

Pro srovnání dat z různých metod je nutné, aby data měla podobný formát a výstup. Toho lze dosáhnout například použitím specializovaných softwarových nástrojů, jako jsou MOVE, WellCAD, LogPlot, CoreBase aj. Vrtná kolonka shrnuje a integruje výsledky strukturní a

petrologické analýzy vrtných jader a vrtů, čímž poskytuje ucelený přehled o horninovém prostředí. V optimálním případě je třeba kombinovat softwarové nástroje, ve kterých se zpracovávají karotážní data, s nástroji makroskopického popisu, jako je např. WellCAD.

Generování sGeoDFN modelu:

Populace puklin

Statistické testy ukázaly, že populace puklin v horninovém masivu nesplňují kritérium pro rovnoměrné rozdělení, ale spíše vykazují charakter pásového (ekvatoriálního) rozdělení se slabou směrovou koncentrací.

Populace 1–5, definované na základě dominantních orientací puklin, vykazují bipolární charakter se střední koncentrací a jsou dobře popsitelné Fisherovou distribucí, která se potvrdila jako vhodný způsob pro generování stochastické DFN sítě z terénních dat.

Analýza neprokázala hierarchický charakter populací z hlediska ukončování puklin. To znamená, že v tomto případě nebylo možné zjistit jasnou závislost mezi staršími a mladšími generacemi puklin. Z toho vyplývá i (ne)možnost systémově zpracovat ukončování všech puklin napříč jednotlivými populacemi. Toho lze spolehlivě dosáhnout pouze u větších stochasticky generovaných a/nebo deterministických struktur v modelu sGeoDFN.

Korelace strukturních a karotážních měření s modelem:

Limity terénních měření

Terénní měření puklin jsou omezena na exponované povrchy horninového masivu v podzemních prostorech, což může vést k podhodnocení celkového počtu a četnosti puklin.

Limity karotážních záznamů

Karotážní záznamy, jako je akustický televizor, poskytují detailní informace o puklinách v hloubce vrtu, ale jejich interpretace může být náročná a ovlivněna technickými faktory. V případě subhorizontálních vrtů se jedná např. o nedokonalou centraci sondy ve vrtu.

Kombinace metod a úprava DFN modelu

Pro optimální výsledky je vhodné kombinovat data z terénních měření, karotážních záznamů a modelování. Orientované vrtné jádro v kombinaci s akustickou kamerou představuje alternativní metodu pro detailní analýzu puklin v hloubce a dle zkušeností z jiných projektů je jejich kombinace pro komplexní popis horninového prostředí žádoucí. Pro dosažení shody mezi modelem sGeoDFN a daty z terénních měření a karotážních záznamů může být nutné upravit četnosti jednotlivých populací puklin v modelu tak, aby více odpovídaly terénním měřením.

Využití 3D modelů pro projektování vrtných prací:

Fotogrammetrické modely chodeb v kombinaci se strukturně-geologickým modelem obklopujícím experimentální blok horniny se ukázaly jako velmi vhodný nástroj pro plánování navazujících technických prací. Nejen že poskytují možnost zobrazení pracovního prostoru v měřítku 1 : 1 kdykoli, ale možnost projekce geologických struktur i do hloubky horninového masivu se ukázala jako nezbytná při plánování průběhu a hloubkového dosahu jednotlivých vrtů. Umožňuje předcházet kolizím s výraznými strukturními prvky nebo minimalizuje vzájemné ovlivnění vrtů.

Vizualizace míst přítoků, porušených zón, puklin z karotážních měření a jednotlivých etáží multipakových systémů je pak klíčová pro jejich design i vyhodnocení.

Instrumentace – měření tlaků v intervalech:

Před samotnou realizací měření je třeba v rámci její projektové přípravy zohlednit následující faktory a postupovat podle níže uvedených bodů. Cílem těchto doporučení je zvolení vhodného průměru vrtu a instrumentace k předpokládaným měřeným tlakům a průtokům.

- Na základě hydrogeologického monitoringu stanovit předpokládaný průtok vody v horninovém masivu.
- Na základě průtoku vody navrhnout vnitřní průměr hadiček tak, aby nedocházelo k ovlivnění („brzdění“) průtoku a tlakovým ztrátám v systému.
- Na základě hydrogeologického monitoringu stanovit předpokládaný tlak vody v horninovém masivu.
- Na základě tlaku vody navrhnout čidla s vhodným rozsahem.
- Mít možnost duplikace měření v jednotlivých intervalech více čidly (tj. různé rozsahy, záložní čidlo – možnost validace).
- Na základě strukturně-geologického mapování, karotážních metod (především ABI, OBI, rezistivimetrie) a vodních tlakových zkoušek odhadnout počet testovacích etáží a volit vhodné intervaly.
- Na základě počtu etáží a průměrů hadiček zvolit vhodný průměr pakru.
- Na základě průměru pakru zvolit vhodný průměr vrtání. Pakry volit tak, aby bylo možné je operativně vyjmout a opět instalovat (např. posun měřicího intervalu).
- Testovací intervaly zvolit co nejkratší a osadit je výplní ke zmenšení mrtvého objemu.
- Nutnost monitoringu dat on-line. Poté lze pružně reagovat na havárie nebo změnit nastavení odečítání.

Vodní tlakové zkoušky:

- Provádění VTZ v ukloněných vrtech je technicky náročnější a hrozí vyšší nebezpečí uvíznutí pakrů než provádění VTZ ve svislých vrtech.
- Provedení karotážních metod před VTZ se ukázalo jako velmi nápomocné pro návrh rozsahu a délky intervalů, ve kterých se mají realizovat VTZ. Metody rezistivimetrie často odhalily výraznou puklinu nebo puklinovou zónu komunikující na větší vzdálenost. Metody ABI/OBI zase identifikovaly pukliny a puklinové zóny s potenciálně vyšší propustností.
- VTZ jsou časově náročné. Pro identifikaci nepropustné zóny plně dostačuje pulzní test. Pro projekt, který je zacílen na konektivitu puklin, nemusí být testy zaměřené na zjišťování hydraulických parametrů relativně nepropustných etáží.
- Pro identifikaci vzájemné hydraulické komunikace mezi oddělenými úseky vrtu, obtékání pakrů apod. je při VTZ vhodné monitorovat také tlak pod testovaným intervalem a výtok z vrtu před a při realizaci zkoušky (na ústí vrtu).
- V podobně zaměřeném projektu je vhodné realizovat VTZ ve dvou etapách – po vyhodnocení přehledových zrychlených VTZ v první etapě zaměřených na kompletní metráž zkoumaných vrtů (etáže většího rozsahu např. po 5–7 m) počítat s provedením VTZ zaměřených na identifikaci a měření individuálních puklin (etáže kratšího rozsahu 1–3 m) ve druhé etapě měření VTZ na daném vrtu.
- Při provádění VTZ na dalším vrtu, kdy sousední vrt již je osazen multipakovým systémem, je vhodné důsledně ověřovat hydraulickou komunikaci s etážemi osazeného vrtu pomocí

sledování nárůstu tlaku/přítoku do jednotlivých etáží. Ukázalo se jako výhodné využití on-line systému pro sledování nárůstu tlaků v etážích osazeného vrtu.

- V případně zjištění neoptimálního rozvržení etáží v osazeném vrtu upravit rozvržení etáží multipakového systému tak, aby lépe zachytil přítoky do sledovaných etáží. Pro tento účel by měl být multipakový systém dopředu koncipován a mělo by s tím být počítáno v harmonogramu prací.

Stopovací zkoušky:

- Pro stopovací zkoušky je vhodné pochopení chování puklinového systému pomocí hydraulických zkoušek (pulzní, dipólové) a na základě předešlých výsledků realizace prediktivního transportního modelu.
- Na základě upraveného prediktivního modelu a laboratorních zkoušek byl proveden návrh experimentu a vstupních parametrů, např. výběr vhodných intervalů, rychlosti průtoku, tlakového gradientu, koncentrace stopovače, doby injektáže stopovače, doby zkoušky, frekvence snímání záznamu a odběrů apod. Nastavení vhodných parametrů zkoušky je nezbytné pro úspěšné provedení testu (např. dostatečně velká odezva maximální a minimální koncentrace, vhodné tlakové pole, doba proplachu systému pro další testy aj.).
- Pro prováděné zkoušky je důležitá stabilita měřicího systému bez nutnosti časté kalibrace (před testem/ověření po testu).
- Pro zkoušky je žádoucí minimalizovat jak „mrtvý objem“ intervalů, tak pomocné instrumentace (např. hadičky, průtočné cely, „vypávký“ intervalů, průměry hadiček). Pro zvolené průtoky je vhodná optimalizace průtočných měřicích cel (v závislosti na mrtvém objemu, rychlosti odezvy na měřené parametry apod).
- Pro dlouhodobé stopovací experimenty je nezbytné zajištění přesné a stabilní instrumentace a současně zázemí (např. bez výpadků elektrické energie).
- Pro stopovací zkoušky využívat podzemní vodu přímo ze studovaného intervalu (např. z důvodu variability geochemického složení podzemní vody v puklinových systémech).
- Při testech ve vodivé zóně s vysokými průtoky z intervalu je pro stopovací zkoušku potřeba velké množství vody. Je tedy nutné odběr vody z vybraného intervalu zahájit s dostatečným předstihem a zajistit tak potřebný objem vody i pro proplachovací fázi testu.
- V rámci testů byly řešeny problémy při vysokých průtocích (až kolem 1,2 l/min), kdy některé měřicí systémy nereagují dostatečně rychle a dochází následně ke zpoždění měřicího signálu (např. měření UV Vis v průtočné cele). Současně může v měřicích celách docházet k tlakovým ztrátám („škrcení“), což má vliv na tlakové změny v systému.
- Při vysokých průtocích může docházet k tlakování systému a zvýšený tlak může následně ovlivňovat detekční systém (např. vliv na měřicí elektrody)
- Při vysokých průtocích je omezené využití standardních automatických odběrových systémů (např. programovatelné autosamplery), neboť při odběru vzorků (přepnutí odběrového ventilu) dochází k zaškrcení/tlakování systému a tím k ovlivnění rychlosti proudění.
- Při využití podzemní vody z puklinového systému je užitečné filtrování podzemní vody (při odběru) z důvodu odstranění možných koloidních částic, zákalu apod.

Další doporučení pro stopovací zkoušky

- Pro stopovací zkoušky a následně vyhodnocení a validaci modelů je vhodné použít diskretní puklinu, která umožní přesnou charakterizaci a následnou validaci měřených

parametrů s modelovými přístupy. Komplikované systémy poruchových zón a velkého počtu puklin (puklinové sítě) komplikují přesnější kalibraci modelů.

- Pro stopovací experimenty využít „jednodušší“ puklinové systémy pro validaci modelů a nejistot.
- Při testech se maximálně snažit využít přirozených podmínek (např. přirozené tlakové poměry, přirozené proudění apod.).
- Pokud je to možné, detekční systém (elektrody, čidla apod.) instalovat přímo do testovaného intervalu, kdy dochází k rychlé reakci na průnik stopovací látky s minimalizací vlivu přídatné instrumentace (např. disperze na hadičkách, tlakové ztráty aj.). Při zapuštění měřicích/detekčních systémů do intervalů je potřeba nastavení vhodného systému kalibrace/ověření měřicího systému (ideálně bez nutnosti vyjmutí celého pakrového systému). V případě nutnosti vyjmutí multipakrového systému a následné instalace je nutné počítat s dobou potřebnou pro ustalování hydrogeologických podmínek.
- Minimalizovat „mrtvý objem“ a to jak samotných intervalů, tak instrumentace.
- Před experimenty důkladně otestovat vybrané stopovače a koncepci testů v laboratorních podmínkách.
- Využití takových měřicích systémů, které umožňují nízké detekční limity pro přesné měření koncentrace stopovačů nad úrovní pozadových hodnot. Současně je vhodné odebírat vzorky v průběhu experimentu pro ověření/zpřesnění měřených koncentrací (měření prováděno v laboratoři).
- Je vhodné využít radionuklidy s konzervativním chováním a nízkými detekčními limity, jejichž transport probíhá nezávisle na podmínkách okolního prostředí (např. HTO). Pro studium advekce je vhodné použít krátkodobé radionuklidy, které po „vymření“ umožňují opakované provedení testu a současně nezpůsobují kontaminaci okolního prostředí radioaktivními látkami.
- Pokud to umožňuje konstrukce experimentu (např. průměry vrtů, pakrový systém), při testování propustných intervalů (s vysokými průtoky) volit hadičky s větším průměrem (minimalizace tlakové ztráty odporem hadiček vs. „mrtvý objem“) či ideálně využít měření studovaných parametrů přímo ve studovaném intervalu (např. konduktivita, ISE elektrody aj.). To je ovlivněno celkovou instrumentací, např. rozměry pakrového systému pro vedení kabeláže apod.

Využití hydrogeologického modelování pro hodnocení puklinového systému:

- Primárním podkladem pro hydrogeologické modelování v puklinovém prostředí (HydroDFN) je geometrický model puklinové sítě sestavený na základě geologického modelu a dat z hydraulických testů, karotážních měření atd. Pro modelová hodnocení ve výpočetních softwarech je jednodušší zpracování tzv. stochastického modelu puklinové sítě založeného na variabilitě parametrů a statistických sadách vstupních dat. Pro potřeby modelového hodnocení prací v tomto projektu byl hlavním podkladem tzv. semi-deterministický model, kde jsou pukliny, respektive jejich průsečíky s vrtů a tunely, v modelu zadány na konkrétních souřadnicích. Tento přístup je nutný z důvodu modelového řešení a hodnocení zkoušek realizovaných na konkrétních puklinových propojeních. Na druhou stranu je tvorba semi-deterministického modelu poměrně hodně subjektivní, závislá na zpracovateli modelu, interpretaci podkladů a může být zatížena velkou chybou, která se pak přenáší do celého procesu modelování. Už ve fázi zpracování geometrického (geologického) modelu je tedy potřeba zabývat se otázkou stanovení nejistot modelu a jeho validací, která bývá často opomíjena a je řešena až v souvislosti

s hydrogeologickým modelováním a výpočtem proudění a transportu. Tvorba semi-deterministických modelů také vyžaduje specifické nástroje na geometrické zpracování generovaných sítí, které standardně nejsou součástí výpočetních softwarů (např. zadání neprotínajících se puklin, stochastické generování středů puklin na 2D ploše apod.).

- Dalším z podkladů hydrogeologického modelu jsou výstupy z VTZ a vyhodnocení transmisivity puklin, respektive testovaných intervalů. Výsledky z kalibrace modelu na transportní testy ukazují, že takto vyhodnocené transmisivity puklin mohou být jen zdánlivé, respektive mohou reprezentovat spíše širší oblast sítě než danou konkrétní puklinu, na které je realizován test, nebo mohou být ovlivněné složitějšími okrajovými podmínkami, než je předpokládáno. Výstupem z realizace optimalizovaného modelu a transportního modelu byly několikanásobně vyšší kalibrované hodnoty transmisivity puklin v porovnání s výsledky VTZ. Z výstupů VTZ doporučujeme v modelech a při jejich kalibraci používat přímo měřené hodnoty průtoku než vyhodnocené transmisivity (tyto používat jako vstupní odhad).
- Vyhodnocení zkoušek a aplikace matematických modelů je podmíněno rozsahem a kvalitou vstupních dat – např. pokud je hodnocen test v intervalu, ve kterém je v rámci geometrie sítě interpretováno více puklin, je pro DFN model potřeba zajistit data pro všechny jednotlivé pukliny. Pokud tomu tak není, lze hodnocení zkoušky se stejným nebo velmi podobným výsledkem realizovat na „ekvivalentním“ DFN modelu, kde je sada puklin v intervalu nahrazena jednou puklinou s odpovídajícími „ekvivalentními“ vlastnostmi (označení EDFN se pro tento typ zjednodušení běžně nepoužívá, ale jako analogie k ECPM se nabízí).
- Při použití ECPM modelů v puklinovém prostředí, které je obvykle doporučováno pro optimalizaci a zrychlení výpočtu, byla zjištěna poměrně velká homogenizace tlakového pole v hornině a odlišné výsledky simulace proudění, v porovnání s výsledky DFN modelů – doporučujeme spíše využívat a rozvíjet možnosti a schopnosti DFN modelování, i za cenu delší doby výpočtu. Případně provést verifikaci výpočtu v komplexním ECPM modelu – numerický výpočet a matematický aparát verifikovaný na jednoduché úloze nemusí plně fungovat na složitější síti ve větším měřítku.
- Modelové vyhodnocení transportního experimentu může být významně ovlivněno vstupními nejistotami v geometrii úlohy, hydraulickém popisu (okrajových podmínkách) a instrumentací experimentu – v závislosti na cíli zkoušky, např. pokud má být výstupem vyhodnocení transportních parametrů, doporučujeme realizovat transportní experimenty v dobře popsaném puklinovém systému a s odpovídající instrumentací zkoušky. Tyto podmínky nicméně nelze vždy zajistit již při návrhu projektu, jejich splnění by nemělo být „svázáno“ harmonogramem prací.
- Porovnání průnikových křivek z výpočtu transportu metodou particle trackingu (transport advekcí, 1D trajektorie) a „plného“ transportu (advekce a disperze ve 2D síti) ukázalo srovnatelnost výsledků, respektive byly vypočteny stejné časy při dosažení maximální koncentrace. Metoda particle trackingu, kterou je možné použít přímo v DFN sítích (narozdíl od výpočtu plného transportu), je tak díky své rychlosti výpočtu velmi efektivním nástrojem pro prediktivní simulace nebo hodnocení zkoušek a stanovení základních transportních parametrů.

11.2 Doporučení dalších prací

Závěrem jsou uvedena doporučení pro další využití stávajícího stanoviště ZK-2 s instrumentovanými vrty S-27, S-31, S-36 a S-8 a doporučení pro případnou realizaci programu na zcela novém stanovišti.

11.2.1 Možné využití stanoviště v ZK-2

- Využití stávající instrumentace pro dlouhodobé stopovací zkoušky na puklině „mesh24“ mezi intervaly S31_2 a S36_3, současně při nižších průtocích a tlakovém gradientu, které jsou svým charakterem blíže přirozeným podmínkám. Tyto podmínky pak přesněji simulují přirozené proudění vody v puklinovém systému.
- Provést další a doplňující experimenty pro pukliny s rozdílnými vlastnostmi (méně vodivé pukliny, puklinové zóny apod), pro získání rozsahu hodnot u rozdílných typů puklin a puklinových zón.
- Testování proudění a transportu ve více intervalech, např. injektáž stopovače do vybraného intervalu s měřením průniku stopovače ve více intervalech současně, což umožní přesnější hodnocení celkové bilance stopovače, hodnocení disperze v systému puklin, doby „čištění“ prostředí, stanovení sorpčních vlastností na površích puklin v závislosti na použitém stopovači.
- Testování různých stopovačů – např. využití koktejlu stopovačů (sorbujič, mírně sorbujič krátkodobé radioaktivní stopovače, DNA nano-stopovače aj.) pro stanovení nejen transportních charakteristik puklin, ale také pro testování a vývoj nových metodik měření.
- Testy s redox-senzitivními stopovači (studium vlivu redoxních podmínek).
- Stopovací zkoušky s radionuklidy (HTO, ^{22}Na). Ověření povolovacího procesu, nastavení podmínek pro práci s radionuklidy, studium transportu radionuklidů v přírodních podmínkách.
- Využití stávajícího systému a vybrané pukliny pro studium transportu bentonitových koloidních částic.
- „Dilution“ testy – cirkulace stopovače v intervalu a hodnocení poklesu koncentrace vlivem přirozeného proudění (v intervalu s propustnou puklinou) nebo difuze (v málo propustném intervalu).
- Testování detekčních systémů. Testy mohou být zaměřeny na vývoj a testování nových měřicích systémů v přirozených podmínkách (např. vliv tlaku, mikrobiologie, salinita roztoku, iontová síla, interference různých prvků). Pozornost lze zaměřit především na on-line měřicí systémy, popř. systémy, které je možné instalovat přímo do studovaných intervalů (důraz na on-line záznam měřených parametrů, stabilitu signálu, detekční limity, citlivost a přesnost, možnosti on-line kalibrace apod).
- Studium/testování převrtání aktivních vzorků (např. po sorpci ^{134}Cs , ^{133}Ba) – příprava na další experimenty. Po stopovacích zkouškách se sorbujičmi RN provést odběr (fixace a převrtání) puklinové zóny. Experiment prověří možnosti studia distribuce aktivity v puklinových zónách, sorpční procesy puklin a jejich výplní, difuzní procesy do horninové matrice apod.
- Studium migrace plynů. Dalším přidruženým transportním médiem mohou být plyny a koloidy. Testy lze zaměřit na transport plynů ve stejných intervalech jako při stopovacích zkouškách s konzervativními stopovači (roztoky). Pro testy by bylo vhodné využít takové plyny, které umožňují jak měření hydraulických podmínek, tak transport a detekci plynu (např. měření Rn, Ar, H).

- Výsledky plánovaných in-situ experimentů budou uplatněny při tvorbě modelů části transportní cesty horninovým prostředím, do kterého budou jako vstupní parametry vstupovat vlastnosti průtokových cest (puklin) a zádržné vlastnosti horninové matrice.
- Ověření manipulace s multipakovým systémem – technické možnosti úpravy instrumentace, vyjmutí multipakového systému z vrtu a změna monitorovaných intervalů ve vrtu S-27, kde je pro testování vhodnější spodní úsek vrtu, úprava vstupních/výstupních trubiček.
- Studium hydraulických vlastností jednotlivých puklin/puklinových zón. Pro přesnější charakterizace GeoDFN a HydroDFN modelu na jednotlivé pukliny/puklinové zóny. Při navrhovaném experimentu by byl vyjmut multipakr z vrtu např. S-36 (pokud by se technicky podařilo) a v tomto vrtu by byly následně realizovány detailní vodní tlakové zkoušky a hydraulické testy pomocí dvojitého pakru s krátkým vymezeným intervalem (např. 1–2 m). V průběhu testů by bylo prováděno měření v ostatních vrtech a intervalech multipakrů. Případně by bylo následně možné realizovat i stopovací zkoušky na vybrané zájmové puklině. Instrumentace dvojitého pakru by mohla být optimalizována pro konkrétní poruchu (tj. minimalizace mrtvého objemu, optimalizace měřicího systému uvnitř intervalu).

11.2.2 Doporučení pro další in-situ experimenty

- Optimální výběr studovaného bloku s ohledem na cíl projektu – např. pro transportní experimenty vybrat jednodušší a jasně definovaný systém puklin, předem dobře popsany po geometrické i hydraulické stránce, tzn. jedna diskretní puklina, jednodušší napojení na okolní síť puklin.
- Dlouhodobý monitoring tlaku a průtoku podzemní vody jako podklad pro popis horninového prostředí a pro plánování experimentů.
- Charakterizace puklinového systému – pro zájmové pukliny nebo poruchové zóny, na kterých budou realizovány experimenty, provést tlakové zkoušky s jednoduchým pakrem (klasické VTZ) nebo jiný typ hydraulické zkoušky (např. pomocí PFL). Doporučujeme zajistit proměření celého vrtu a identifikovat všechny významné vodivé struktury, včetně jejich korelace s geologickým popisem a dalšími měřeními daty (např. z karotáže) – cílem charakterizace je získat větší statistický soubor vstupních dat, který je možné dále využít pro stochastický popis lokality.
- Na základě hydrogeologického monitoringu a strukturně-geologického mapování volit komponenty monitoringu, např. trubičky dimenzovat na očekávané přítoky, počet pakrů zvolit v souladu se složitostí geologických poměrů. Těmto podmínkám následně přizpůsobit vhodný průměr vrtání.
- Stopovací zkoušky s radionuklidy a studium reaktivního transportu. Provedení stopovacích zkoušek s „koktejlem“ stopovačů pro studium konzervativního proudění (např. NaCl, HTO, KI, fluorescein), popř. mírně sorbující (Rhodamin WT, ^{22}Na) v rámci jednoho testu (tj. zaručení stejných vstupních podmínek). Pro minimalizaci případné kontaminace horninového prostředí radionuklidy je žádoucí využití krátkodobých radionuklidů (např. ^{24}Na , ^{42}K , ^{198}Au , ^{166}Ho , ^{188}Re). Krátkodobé radionuklidy významně snižují environmentální dopad na horninové prostředí, bezpečnost a legislativní požadavky na uvolňování zdroje do prostředí. V rámci vývoje by byly testovány a aplikovány nové on-line detekční systémy navazující na projekt Rademet (Zuna et al. 2021b).

Při realizaci experimentů doporučujeme:

- Využití možností matematického modelování jako nástroje pro návrh nebo detailní hodnocení – podkladem a vstupem do modelů jsou relevantní data z charakterizace horninového prostředí, zpracovaná pro další použití (vyhodnocená a zpracovaná surová data) a s vyhodnocenou mírou nejistoty. Parametry s větší nejistotou lze modelovat statisticky.
- U víceletých nebo komplexně zadaných projektů s větším množstvím realizovaných prací (etap) umožnit a zjednodušit úpravy harmonogramu prací v závislosti na dosažených výstupech a zjištěných nejistotách, provést doplňující práce nebo opakovat již realizované. Případně rozdělit složitější projekt na více samostatných celků (projektů), navržených a vypisovaných postupně.
- Transportní testy a následná vizualizace transportní cesty: tj. studium distribuce a transportu diskrétní puklinou např. i se sorbujícími stopovači. Po testu by byla poruchová zóna/puklina injektována fluorescenční pryskyřicí, převrtána a provedeno studium a zhodnocení retardace a průniku stopovače do horninové matrice. Studium tak umožní popsat retardační procesy v puklinové zóně, současně pak prostup stopovače do horninové matrice (vliv difuze), který je ovlivněn puklinovými výplněmi apod.
- „Dilution“ test, při kterém probíhá cirkulace stopovače ve vymezeném intervalu a postupně dochází k poklesu koncentrace/aktivity vlivem přirozeného proudění (v intervalu s propustnou puklinou) nebo difuze do horninového prostředí (v případě málo propustného intervalu) či retardace. Na základě matematického modelování je možné optimalizovat transportně-difuzní modely a získat tak transportní parametry z reálného prostředí.
- Na méně porušeném bloku (diskrétní puklina) studovat advekčně-difúzní procesy (dlouhodobý experiment s možností studia difuze do horninové matrice – validace matematických modelů).
- Hodnoty hydraulických a transportních parametrů doporučujeme zkoumat nejen u jednotlivých puklin, ale také u poruchových zón nebo struktur tvořených sérií propojených subparalelních puklin – tyto struktury mohou mít podobné hydraulické vlastnosti (propustnost), ale vzhledem ke svému porušení mají větší povrchovou plochu a vyšší pórovitost, mohou obsahovat výplně s vyšší sorpční schopností a mít zcela odlišné transportní vlastnosti.

12 Citace a seznam literatury

- BUKOVSKÁ Z., VERNER K. (EDIT) (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov, Závěrečná zpráva, MS, SÚRAO. 2017.
- BUKOVSKÁ Z., SOEJONO I., VONDROVIC L., VAVRO M., SOUČEK K., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., ŠVAGERA O., WACLAWIK P., ŘIHOŠEK J., VERNER K., SLÁMA J., VAVRO L., KONÍČEK P., STAŠ L., PÉCSKAY Z., VESELOVSKÝ F. (2019): Characterization and 3D visualization of underground research facility for deep geological repository experiments: A case study of underground research facility Bukov, Czech Republic.– *Engineering Geology*, 259, 105186.
- ConnectFlow Team (2020): ConnectFlow, Technical Summary, Version 12.2. Jacobs.
- ConnectFlow Team (2021): ConnectFlow, Technical Summary, Version 12.3. Jacobs.
- CRAWFORD J. (2008): Bedrock transport properties Forsmark. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark. SKB R-08-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- FIELD, M. (2002): The QTRACER2 program for Tracer Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other hydrologic Systems. – U.S. Environmental protection agency, hypertext multimedia publication in the Internet at <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=54930>
- FISHER N.I., LEWIS T., EMBLETON B.J.J. (1993): Statistical analysis of spherical data. 329 s. Cambridge University Press (CUP).
- GVOŽDÍK L., KABELE P., ŘÍHA J., ŠVAGERA O., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A., A KOLEKTIV. (2020): Transport radionuklidů z hlubinného úložiště/Testování koncepčních a výpočetních modelů – Závěrečná zpráva. Závěrečná zpráva, SÚRAO – Správa úložišť radioaktivních odpadů, Praha.
- KABELE P., ŠVAGERA O., SOMR M., NEŽERKA V., ZEMAN J., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., JELÍNEK J., SOEJONO I. (2017): Mathematical Modeling of Brittle Fractures in Rock Mass by Means of the DFN Method. Final report, SÚRAO – Radioactive Waste Repository Authority, Prague, Czech Republic.
- KRYL J., ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., SOEJONO I., ZELINKOVÁ T. (2020): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov - Průběžná zpráva č. 1 - část 2 - Charakterizace zájmového místa. SÚRAO 459/2020
- KŘÍBEK B., ŽÁK K., DOBEŠ P., LEICHMANN J., PUDILOVÁ M., RENÉ M., SCHARM B., SCHARMOVÁ M., HÁJEK A., HOLECZY D., HEIN U., LEHMANN B. (2009): The Rožná uranium deposit (Bohemian Massif, Czech Republic): shear zone-hosted, late Variscan and post-Variscan hydrothermal mineralization. – *Mineralium Deposita*, 44, 1, 99–128.
- MOYE D.G. (1967): Diamond drilling for foundations. *Aust. Civil Eng. Trans.*, CE 9(1): 95–100.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., JELÍNEK J., SOEJONO I. (2017): Metodika dokumentace výchozových partií pro účely DFN modelování. Technická zpráva, SÚRAO – Správa úložišť radioaktivních odpadů, Praha.
- TERZAGHI R. (1965): Sources of error in joint surveys. *Geotechnique*, 15(3), 287–304.

- ZUNA M., HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., JANKOVSKÝ F., GRECKA M., ŠVAGERA O., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., SOSNA K., GVOŽDÍK L. (2020): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov - Průběžná zpráva č. 1 - část 1- Rešerše. SÚRAO 459/2020.
- ZUNA M., HAVLOVÁ V., ŠVAGERA O., HOLEČEK J., SOSNA K., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L. (2020): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov - Průběžná zpráva č. 1 - část 3 - Realizační projekt. SÚRAO 459/2020.
- ZUNA M., HAVLOVÁ V., JANKOVSKÝ F., ŠVAGERA O., KRYL J., ZELINKOVÁ T., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., SOSNA K., KOŘALKA S., GVOŽDÍK L. (2020b): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov - Průběžná zpráva č. 2. SÚRAO 521/2020.
- ZUNA M., HAVLOVÁ V., JANKOVSKÝ F., ŠVAGERA O., SOSNA K., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., HOFMANOVÁ E., KOČAN K., KRYL J., ZELINKOVÁ T., KOŘALKA S. (2021): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov - Průběžná zpráva č. 3. SÚRAO 551/2021.
- ZUNA M., JANKOVSKÝ F., ŠVAGERA O., SOSNA K., GVOŽDÍK L., KABELE P., SKALA V., MILICKÝ M., POLÁK M., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., KRYL K., ZELINKOVÁ T., HAVLOVÁ V. (2022): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov – Průběžná zpráva č. 4. SÚRAO 630/2022.
- ZUNA M., JANKOVSKÝ F., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., SOSNA K., ŠVAGERA O., DOBEŠ P., KABELE P. (2023): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov – Průběžná zpráva č. 5. SÚRAO 702/2023.
- Zuna M., Dobrev D., Jankovský F., Havlová V., Kůs P., Šoltés J., Vratislavská H.A., Jakůbek J., Doubravová D., Palušák M. (2021b): Využití krátkodobých RAdiostopovačů a vývoj jejich DEtekčních METod pro popis procesů, ovlivňujících transport kontaminantů v životním prostředí (RADEMET) MPO TRIO FV30430. Závěrečná zpráva projektu – Technická zpráva, ÚJV Z5628



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@surao.cz | www.surao.cz