

Podzemní laboratoř Josef a nové výzvy

J. Šťástka, J. Bendl, Z. Rudovský, M. Kulíková, J. Svoboda, J. Pruška

České vysoké učení technické v Praze

ABSTRAKT: Podzemní laboratoř Josef je akademické pracoviště, ve kterém probíhá především výzkumná činnost. Byla zprovozněna v roce 2007 Fakultou stavební ČVUT, konkrétně Centrem experimentální geotechniky, a to i díky podpoře společnosti Metrostav a.s. Většina výzkumných a vývojových aktivit se zaměřuje na bezpečné a udržitelné ukládání radioaktivních odpadů. Tento výzkum nadále pokračuje za podpory Správy úložišť radioaktivních odpadů, mimo jiné i ve spolupráci se společností ÚJV Řež a.s. Dlouhodobé zkušenosti z těchto projektů vedly v roce 2025 k podpisu memoranda o bilaterální spolupráci s korejskou organizací Korea Atomic Energy Research Institute. Společně s korejskými partnery je v současnosti řešen projekt Optimalizace materiálů a technologií pro ukládání radioaktivních odpadů v hlubinných úložištích (TAČR – program SIGMA, TQ1600084). Projekt má tři hlavní cíle: vývoj bentonitového granulátu, experimentální testování šíření látek v bentonitu a výstavbu in-situ experimentu v měřítku 1:1.

Mezi další aktuální in-situ projekty patří výzkum zaměřený na využití starých důlních děl a odpadních materiálů pro sezónní ukládání energie. Rozvíjejícím se tématem je také možnost výzkumu v oblasti bezpečného ukládání vodíku. V roce 2024 se Podzemní laboratoř Josef stala testbedem pro podzemní stavby v rámci Národního centra stavebnictví 4.0. Tato spolupráce přinesla nové výzvy v oblasti podzemního stavitelství, zejména v oblastech digitalizace a robotizace.

V oblasti digitalizace se činnost zaměřuje především na tvorbu georeferencovaného BIM modelu provozovaného podzemního prostoru. V tomto modelu jsou zpracovány jak bezpečnostní prvky, tak realizované experimenty. Od poloviny roku 2025 probíhá vývoj autonomního nakladače pro podzemní stavby, včetně jeho digitálního dvojčete, které se pohybuje v digitálním modelu podzemí PL Josef. Jedním z rozvíjených projektů je univerzitní robot JULBOT (Josef Underground Laboratory Bot) – robustní, dálkově řízený stroj pro inspekci a monitoring podzemních staveb, vybavený senzory a připravený pro komplexní analýzu prostředí i tvorbu vlastního BIM modelu. Do experimentálních činností jsou zapojováni nejen studenti postgraduálního studia. V současnosti se i zahraniční studenti věnují tématům, jako je například šíření plynů v bentonitu, akustika podzemních staveb, těsnění rybníků či technologie ražby podzemních děl. Podzemní laboratoř Josef je již 18 let v provozu, a i nadále se jí daří řešit nová, pro výuku i výzkum aktuální témata.

1. ÚVOD

Podzemní laboratoř Josef (PL Josef) představuje výukové, výzkumné a experimentální pracoviště Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze. Součástí areálu PL Josef je průzkumná štola – štola Josef. Areál se nachází u Slapské přehrady nedaleko obce Chotilsko. Hlavní úlohou pracoviště z akademického pohledu je poskytovat studentům možnost praktické výuky v autentickém podzemním prostředí, podporovat realizaci experimentálních projektů a posilovat propojení univerzitního vzdělávání s praxí.

Štola Josef byla vyražena v 80. letech 20. století v rámci geologického průzkumu ložisek zlata Mokrsko a Čelina. Celkem bylo vyraženo téměř osm kilometrů podzemních prostor. V 90. letech byla štola opuštěna. V roce 2007 byla štola otevřena v rámci postupně rozvíjejícího se projektu „Podzemní laboratoře Josef“. V první fázi bylo zprovozněno 600 m a započaly výukové a výzkumné aktivity. V roce 2026 je zprovozněno na 6 km podzemních prostor a povrchový areál Podzemní laboratoře Josef.

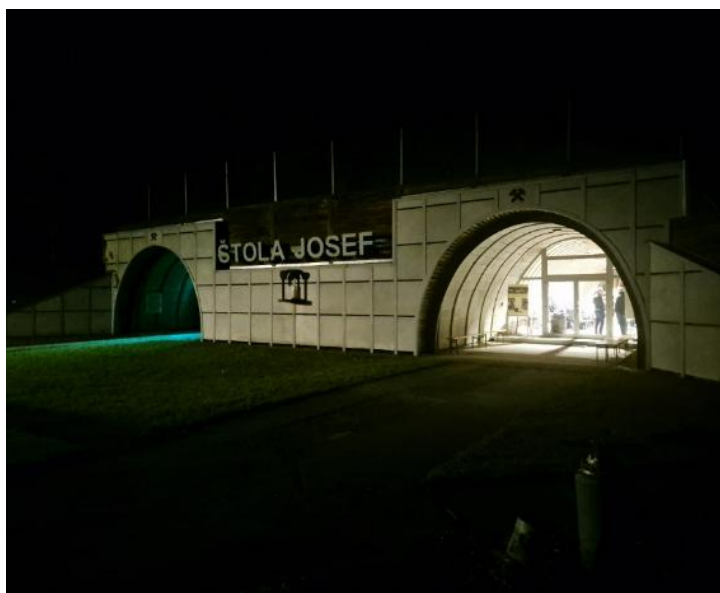
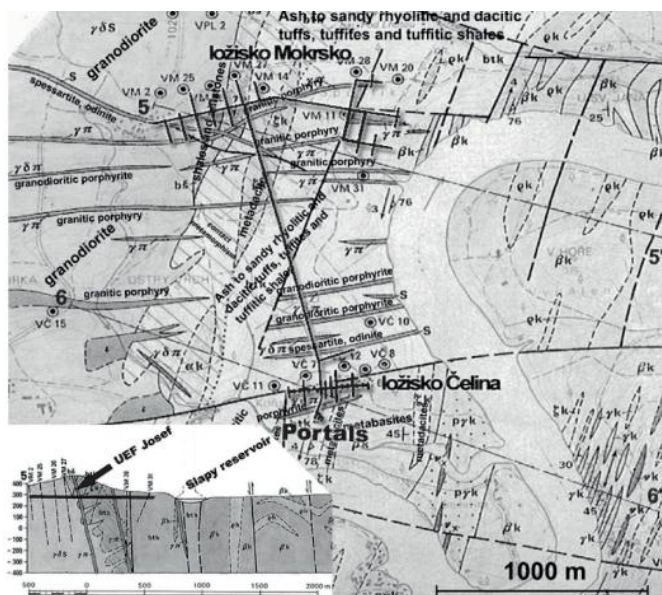
Především PL Josef slouží k řešení výzkumných aktivit s dopadem na současná celospolečenská a průmyslová témata. Dlouhodobě zde probíhají experimenty související např. s bezpečným ukládáním radioaktivních odpadů či ukládáním energií. Dále jsou pak zde testovány nové technologie spojené s výstavbou či provozem podzemních děl. Vzhledem k rozvíjejícím se možnostem Průmyslu 5.0 probíhají aktivity spojené s digitalizací, automatizací a robotizací. Průmysl 5.0 jistě představuje nové výzvy pro PL

Josef, ale i pro celé stavitelství. Např. rozvíjející se BIM jako nástroj pro zvyšování efektivity je určitě také vhodný pro testování v PL Josef. Právě z toho důvodu nyní probíhá vývoj unikátního BIMového prostředí PL Josef, ve kterém budou znázorňovány nejenom podzemní, ale také i probíhající experimentální práce. V rámci aktivit Průmyslu 5.0 v PL Josef probíhá i testování robotických a autonomních systémů. Postupně jsou rozvíjena témata spojená s inspekcí a monitoringem staveb či řešení kritických situací. Do těchto aktivit jsou zapojeny i další ústavy ČVUT v Praze včetně pracovníků Českého institutu informatiky, robotiky a kybernetiky. V rámci platformy, která je označena zkratkou JULBOT, se realizují první projekty ve spolupráci s praxí, např. je řešen projekt autonomního nakladače pro podzemní stavby.

2. ZÁKLADNÍ INFORMACE O PODZEMNÍ LABORATOŘI JOSEF

Areálu PL Josef lze rozdělit na tři části. Podzemí je tvořeno znovu otevřenou štolou Josef. Povrchový areál je druhou částí a poslední částí je administrativní budova Regionálního podzemního výzkumného centra URC Josef (Josef Underground Research Centre). V této budově se nacházejí kanceláře, zasedací místnost a akreditované laboratoře.

Podzemní část (štola) je vyražena v rudním revíru Psí hory a prochází dvěma odlišnými geologickými formacemi severo-severovýchodním směrem napříč horninovým masivem Veselého vrchu. Jednu část tvoří sedimentární horniny Jílovského pásma (převážně proterozoické) druhá část je tvořena magmatickými granitoidy Středočeského plutonu, viz mapka na Obrázku 1. Podzemní část byla rozdělena v rámci geologického průzkumu podle ložisek na části (ložiska) Čelina a Mokrsko (Obrázek 1) a dále se štola rozlišuje na části Mokrsko-západ, Mokrsko – východ, Čelina- západ a Čelina-východ. Ložiska Čelina a Mokrsko jsou spojeny páteřní štolou, která je dlouhá 1835 m (v příčném průřezu má velikost 14 až 16 m²) a je ukončena důlním komínem o hloubce 136 m. Tento důlní komín zabezpečuje přirozený tah důlních větrů v páteřní štolě. Přirozené větrání rozdílem teplot v podzemí a na povrchu také probíhá v části Čelina-východ, kde je v úrovni +40 m realizovaný únikový portál do svahu. Další části jsou nuceně větrány. Na štolu navazují další liniová průzkumná díla s četnými rozrážkami, jež sledují rudní struktury. Na Čelině – západ jsou štoly napojeny do dalších dvou pater (+20 m a + 40 m). Celková délka chodeb tak dosahuje necelých 8 km. Na ložisku Čelina-východ byla v letech 1989–1991 také vyražena kaverna o výšce 40 m. Vytěžená rubanina (cca 6000 m³) byla odvezena, prošla náročnou úpravou a bylo z ní získáno 21,5 kg zlata. Je nutné zmínit, že pro tuto experimentální těžbu byla vybrána nejbohatší část ložiska. Průměrné obsahy zlata se na lokalitě pohybují do 3 g na tunu rubaniny.



Obrázek 1 - Půdorysné řezy štoly Josef (vlevo znázornění v geologické mapě, 1992 a vpravo vstupní portály do podzemí štoly Josef). (SVOBODA, Jiří, Jan SMUTEK a Jiří ŠTÁSTKA. 2012; MORÁVEK, Petr a et al. 1992).



Obrázek 2 – Půdorysný řez z nového georeferencovaného 3D modelu štoly Josef. Z 8 km je provozováno zhruba 6 km podzemních prostor. Z původního důlního díla tedy není zprovozněno zhruba 2 km v oblasti ložisko Mokrsko-východ.

3. VÝZKUM A VÝVOJ V PODZEMNÍ LABORATOŘI JOSEF

3.1 HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ

Česká republika podporuje jadernou energetiku jako jeden z hlavních energetických zdrojů, a je proto nezbytné řešit i konec palivového cyklu, tedy zajistit bezpečnou izolaci radioaktivních odpadů, které jsou v souvislosti s provozem jaderných elektráren produkovány, po požadovanou dobu – v řádu až jednoho milionu let. Potřebná doba izolace je určena na základě bezpečnostních výpočtů, které zohledňují různé scénáře budoucího vývoje hlubinného úložiště. Pro tato hodnocení je nutné získávat kvalitní data, a prostředí Podzemní laboratoře Josef je vhodné.

Část horninového prostředí PL Josef je z hlediska tektonických, geotechnických a petrofyzikálních vlastností obecně podobná některým vybraným lokalitám, z nichž se v současnosti vybírají dvě nejvhodnější pro umístění hlubinného úložiště v České republice. Přestože se PL Josef nenachází v předpokládané hloubce budoucího hlubinného úložiště pro vyhořelé jaderné palivo, lze v této laboratoři provést testy, které mohou poskytnout cenné a validní údaje pro vývoj bezpečného hlubinného úložiště.

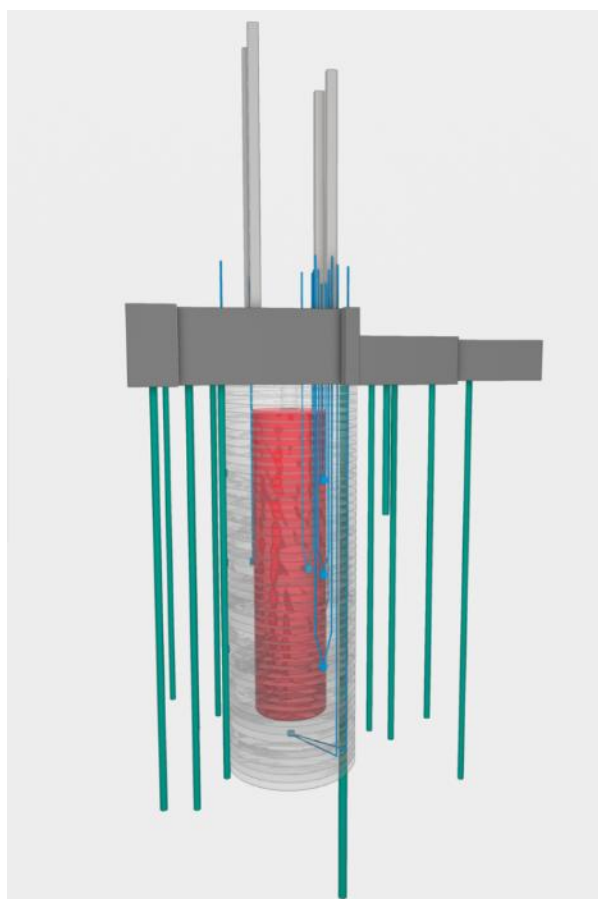
Například množství kyslíku v přítocích podzemní vody závisí především na jejich vydatnosti a míře oddělení od hlavních štol (které představují zdroj kyslíku). Z tohoto hlediska tedy není zásadní rozdíl mezi hloubkou 100 či 600 metrů pod povrchem. Obdobné tvrzení platí i pro chemické složení – rozdíly způsobené samotnou hloubkou jsou minimální. Štoly v PL Josef jsou otevřeny již několik desítek let, prostředí se stabilizovalo a nachází se tak v rovnováze. Mezi jednotlivými přítoky nejsou velké rozdíly, což může být významnou výhodou například pro některé oblasti dlouhodobého korozního výzkumu ukládacích obalových souborů pro vyhořelé jaderné palivo. Pro některé typy výzkumných prací jsou však důležité také mechanické parametry horninového prostředí, které s výškou nadloží souvisejí. Maximální výška nadloží je v PL Josef zhruba 150 m.

V České republice probíhá výzkum související s hlubinným úložištěm primárně v Podzemním výzkumném pracovišti Bukov (SMUTEK, Jan, Jaromír AUGUSTA a Lukáš VONDROVIC. (online). 2020,) a to v hloubce 550 metrů, tedy v hloubce odpovídající budoucí hloubce hlubinného úložiště. Obě pracoviště PVP Bukov a PL Josef se tak vhodně doplňují. Jelikož se jedná o již existující podzemní díla, jde o ekonomicky efektivní variantu před vybudováním samotného charakterizačního pracoviště, které vznikne až na finální lokalitě hlubinného úložiště. Česká republika je zavázána naplňovat evropské požadavky v oblasti nakládání s vyhořelým jaderným palivem a radioaktivními odpady, včetně závazku zajistit bezpečné řešení pro jejich konečné uložení. Vzhledem k plánované výstavbě nových jaderných zdrojů a požadavkům taxonomie EU je strategickým cílem zprovoznit hlubinné úložiště do roku 2050.

Tento cíl předpokládá vysokou úroveň technické připravenosti, proto je nezbytné maximálně využít dostupné odborné kapacity, výzkumná zařízení a infrastrukturu – včetně obou podzemních laboratoří: PL Josef a PVP Bukov.

3.1.1 MATEO projekt

Hlavní snahou projektu s názvem Optimalizace materiálů a technologií pro ukládání radioaktivních odpadů v hlubinných úložištích (TAČR – program SIGMA, TQ16000084) je rozšíření bilaterální spolupráce mezi Českou republikou a Korejskou republikou a sdílení znalostí a zkušeností v oblasti konečného ukládání vyhořelého jaderného paliva, konkrétně v oblasti použití granulovaného bentonitu pro těsnící a výplňové vrstvy v hlubinném úložišti. Pro naplnění cílů programu bylo vytvořeno konsorcium s ÚJV a.s. a korejskými organizacemi KEARI a HBC. V České republice se výzkum zaměřuje na ověření nové výstavby bentonitové vrstvy okolo kontejneru s vyhořelým jaderným palivem. Je připravován experiment v měřítku 1:1 a v současnosti jsou mj. realizovány vrtné práce - velkoprofilový vrt o průměru 1650 mm do hloubky 5300 mm. Nejdříve byl proveden testovací vrt, který nyní slouží demonstraci způsobu ukládání vyhořelého jaderného paliva pro veřejnost a zároveň jsou zde testovány technologie pro sledování postupu výstavby experimentu, viz Obrázek 3 vlevo. Tříletý projekt má tři hlavní cíle: vývoj bentonitového granulátu, experimentální testování šíření látek v bentonitu a výstavbu in-situ experimentu v měřítku 1:1. Na Obrázek 3 vpravo je koncepční návrh experimentu. Koncepční návrh v podobě model BIM je obohacován o časovou informaci. Vzniká tak 4D model, který dokáže porovnávat plánovaný postup experimentu se skutečně vykonanými kroky.

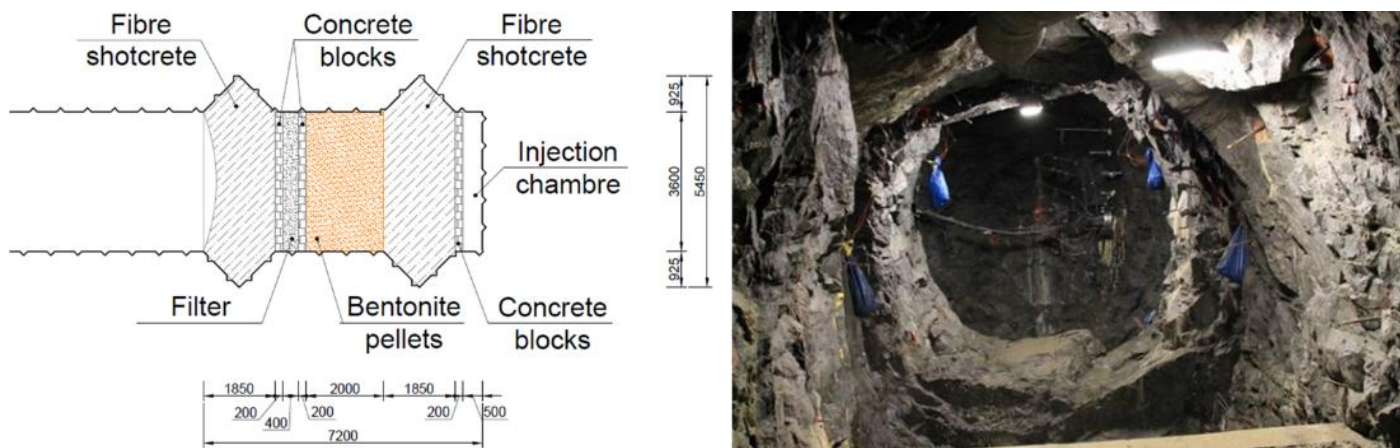


Obrázek 3 – Vlevo je zkušba velkoprofilového vrtání v podzemí (průměr vrtu 1650 mm a hloubka okolo 2000 mm) pro projekt MATEO s trubkou která naznačuje svislé uložení kontejneru s vyhořelým jaderným palivem a vpravo je 3D koncepční návrh experimentu projektu MATEO (zelené úzké vrty označují monitoring horniny, tmavě šedivou je betonové plato na počvě a červeně je označeno topné těleso, které bude simulovat uložení vyhořelého jaderného paliva ve vrtu o průměru 1650 mm (světle šedivá) a hloubce 5300 mm.

3.1.2 EPSP těsnící zátka pro hlubinné úložiště

V září roku 2012 byl v Podzemní laboratoři Josef zahájen mezinárodní projekt DOPAS (Full Scale Demonstration of Plugs and Seals), který řešilo 14členné konsorcium evropských institucí a mezi nimi tři české subjekty – SÚRAO, ÚJV Řež a Fakulta stavební ČVUT v Praze. Náplní projektu je návrh, výstavba,

provoz a vyhodnocení fyzikálního modelu „zátky“ pro utěsnění přístupových štol hlubinného úložiště radioaktivních odpadů 2014. Dostupné také z: <https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2014>). V rámci projektu byla postavena EPSP (Experimental Pressure and Sealing Plug) zátka (SVOBODA, Jiri, Lucie HAUSMANNOVA, Radek VAŠIČEK, et al. 2016) V roce 2025 připravila SURAO projekt rozebírání EPSP. Cílem tohoto projektu je komplexně vyhodnotit EPSP zátku. Dílčími cíli jsou a) zjištění stavu konstrukce a betonu vnější zátky; b) posouzení homogenity a stupně nasycení bentonitového těsnění; c) zhodnocení změn vlastností použitých materiálů kontaktní zóny bentonit / beton vnitřní zátky; d) vyhodnocení použitelnosti karotážních a geotechnických měření a e) analýza transportu bentonitu do puklin v případě výskytu eroze. Rozebírání tohoto unikátního projektu je naplánováno na srpen 2026.



Obrázek 4 – Vlevo je svislý řez experimentální zátky EPSP a vpravo je pohled do rozrážky před výstavbou EPSP.

3.2 UKLÁDÁNÍ ENERGIE

Aktuálně řešenými projekty souvisejícími s ukládáním energií jsou Horninová akumulace sezónního tepla (RASH, TAČR – TS01030218) a Inovativní systém pro ukládání tepelné energie na bázi recyklovaných odpadních surovin (INTES – TAČR - TS01030096).

3.2.1 Horninová akumulace sezónního tepla

Cílem projektu RASH je vývoj inovativních materiálů a technologií pro akumulaci tepla v horninovém prostředí a návrh efektivního provozu energetického úložiště. Akumulace energie představuje jeden z klíčových pilířů probíhající transformace energetického sektoru, a to zejména v kontextu rostoucí produkce elektřiny z obnovitelných zdrojů v letních měsících a současně zásadní potřeby tepla v období zimy. Pokud budou dosažené výsledky příznivé, lze očekávat jejich praktické uplatnění ve střednědobém horizontu. Ambicí projektu je proto experimentálně demonstrovat vybrané technologické postupy a ověřit jejich realizovatelnost v provozních podmínkách. Provozní podmínky budou simulovány v podzemí PL Josef.

Úspěšná implementace navrhovaných řešení by mohla přispět k transformaci českého teplárenství směrem k nízkoemisnímu provozu. Zvláštní potenciál mají technologie v prostředí se specifickými podmínkami, například v oblastech s dostupnými důlními díly nacházejícími se v blízkosti městských aglomerací, kde je provozována soustava centrálního zásobování teplem (CZT). Pokud by bylo možné v letních měsících efektivně využívat přebytky levné elektřiny z fotovoltaických elektráren k „nabíjení“ tepelných úložišť a následně toto teplo v zimě využít, mohlo by se toto řešení stát významným krokem k naplňování cílů Vnitrostátního plánu ČR pro energetiku a klima.

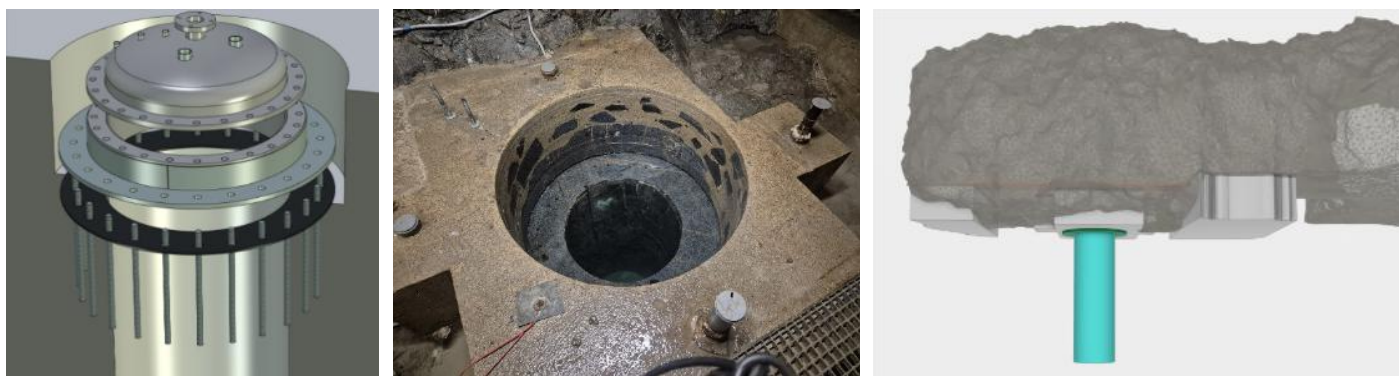
Rok 2025 přinesl zásadní posun oproti předchozímu období, které bylo zaměřeno převážně na rešeršní činnost, analytické práce a tvorbu koncepčních návrhů. V průběhu roku 2025 se projekt zaměřil především na přechod od těchto úvodních úvah k detailním technickým návrhům, přípravě experimentální infrastruktury a realizovatelným technickým řešením.

Hlavní pozornost byla věnována dvěma klíčovými komponentám – laboratornímu zásobníku tepla a horninovému zásobníku. Laboratorní zásobník je provozován v budovách Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (UCEEB). U laboratorního zásobníku došlo k zásadní modernizaci a k návrhu prvků umožňujících uzavření energetické bilance celého systému. Současně byla

zahájena příprava na dlouhodobý automatizovaný provoz, který má zajistit stabilitu a reprodukovatelnost experimentů.

V případě horninového zásobníku (Obrázek 5) probíhal intenzivní vývoj konstrukčních řešení. Byly navrženy a částečně vyrobeny klíčové technologické celky, včetně robustního technologického rámu, tlakových prvků a bezpečnostních komponent. Zároveň byly zahájeny instalační práce v podzemí. Také probíhaly technické přípravy v podzemí pro výstavbu Terénního zásobníku.

Současně pokračovaly práce na zpřesňování matematických modelů jednotlivých typů zásobníků. Tyto modely byly průběžně kalibrovány na základě nově získaných experimentálních dat, geotechnických měření a doplňujících vstupních parametrů. Významný posun nastal také u terénního zásobníku, u něhož byla finálně upřesněna koncepce a rozpracován návrh technologie plánované k realizaci v následujících etapách projektu. (*Průběžná zpráva 2026*). Řešitelský kolektiv vede Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze a spolu s Fakultou stavební (PL Josef) se projektu účastní tři firmy (Watrad s.r.o., Progeo s.r.o. a SG Geotechnika a.s.).



Obrázek 5 - Tlakový uzávěr horninového zásobníku. V zásobníku bude sledováno chování podzemního systému při použití kapalného média. Uprostřed je připravený vrt o průměru 750 mm s převrtáním 1200 mm pro usazení tlakového uzávěru a vpravo je výstup z připravovaného digitálního modelu experimentu.

3.2.2 Inovativní systém pro ukládání tepelné energie na bázi recyklovaných odpadních surovin

Hlavním cílem projektu je vytvořit systém akumulace tepelné energie zahrnující využití odpadních materiálů. Od možnosti ukládání energie během výrobních špiček a odložené spotřeby se odvíjí zvýšení efektivity obnovitelných zdrojů energie (*Dílčí odborná zpráva 2025*).

Důraz je kladen zejména na efektivní integrované řešení kombinující skladování tepelné energie (STE) s technologiemi obnovitelné energie (OZE) s operační teplotou. V projektu jsou uvažovány dvě varianty s operační teplotou 400 °C a 900°C. Ambicí projektu je vyvinout a ověřit možnosti STE založené na zhodnocení odpadu vznikajícího ve slévárenských provozech.

Na realizaci se podílí řešitelský kolektiv složený z vědeckých týmů tří univerzit: České vysoké učení technické v Praze, Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích a Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

V Podzemní laboratoři Josef probíhá výstavba in situ experimentu, resp. modelu pro testování materiálů pro ukládání tepla, který bude sloužit k ověření funkčnosti navrženého řešení akumulace energie, detailní charakteristice tepelných a trvanlivostních parametrů v podzemním prostředí a sběru dat pro modelování tepelných a napjatostních procesů. V roce 2024 proběhla v Podzemní laboratoři Josef příprava místa vybraného pro realizaci a byly zahájeny práce na vypracování projektu experimentu včetně návrhu a přípravy monitoringu. Pro zásobník byl připraven svislý velkoprofilový vrt o průměru 750 mm a hloubce 1800 mm. Dále pak probíhaly práce spojené s finalizací návrhu fyzikálního in situ modelu včetně jeho digitalizace a 3D modelu (Obrázek 6). Fyzikální model je připravován tak aby splnil použití nástrojů BIM a jsou připravována data v odpovídajících formátech.



Obrázek 6 – Vlevo je foto při realizaci vrtu pro experiment projektu INTES a vpravo je koncepční návrh experimentu, kde by budou testovány odpadní materiály ze sléváren pro ukládání energií.

3.3 DIGITALIZACE, AUTOMATIZACE A ROBOTIKA

Podzemní stavby představují jedno z technicky nejnáročnějších odvětví stavebnictví. Práce v omezeném prostoru, často nehomogenní horninové prostředí, obtížná přístupnost a vysoké nároky na bezpečnost a kvalitu prostředí vyžadují moderní postupy. Digitalizace, automatizace a robotika jsou trendy, které jsou rozvíjeny i v podzemním stavitelství. Bylo tedy nutností se tímto začít zabývat i ve výuce a v projektech v PL Josef. V následujícím textu jsou uvedeny příklady tří řešených projektů. Tyto aktivity jsou řešeny převážně ve spolupráci s Národním centrem pro stavebnictví 4.0. Podzemní laboratoř je testbedem NCS 4.0 pro podzemní stavby.

3.3.1 Digitalizace Podzemní laboratoře Josef

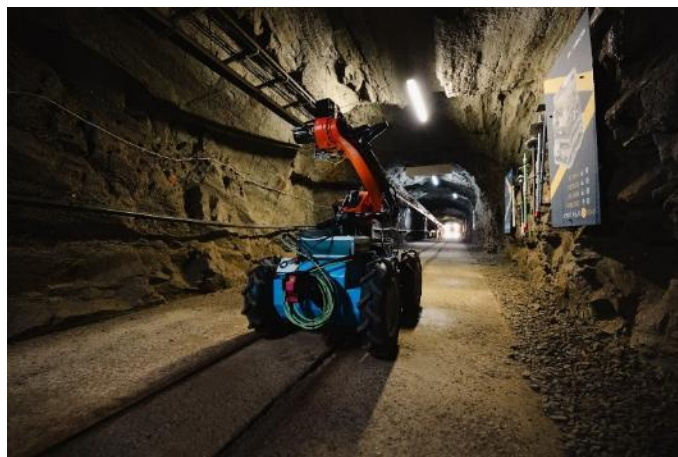
Projekt digitalizace Podzemní laboratoře Josef má za cíl transformovat univerzitní pracoviště na digitálně řízené dílo. Cílem projektu je vznik tzv. digitálního dvojčete s oboustrannou vazbou – realita zjištěná v laboratoři jako např. teplota v rozrážce, pokles hutněného bentonitu v prováděném experimentu, se automaticky přenáší na dvojčete a naopak např. vypnutí světel ve dvojčeti automaticky vypne světla v podzemní laboratoři.

Cesta k vytvoření digitálního dvojčete není přímočará už proto, že se jedná o unikátní rozsáhlé podzemní dílo atypické ve všech směrech. Prvním nezbytným krokem digitalizace byla pasportizace, tj. revize a zpracování již existujících informačních zdrojů. Byly revidovány stávající mračna bodů a výkresy vytvořené v průběhu let, od výstavby díla až do dnešní doby. Zatímco některé části podzemí byly v průběhu let zmapovány opakovaně v různé kvalitě, některé oblasti nebyly zaznamenány vůbec nebo pouze v archivních 2D výkresech. U zmapovaných míst však často chyběla zásadní informace – geoprostorová lokalizace. Proto byla provedena řada dodatečných laserových skenů doplňujících znalostní mezery po celém prostoru všech rozrážek a štol. Současně s revizí datových zdrojů proběhla implementace společného datového prostředí CDE TrimbleConnect. Tím začal být řízen informační tok celého projektu. Druhým krokem bylo vytvoření BIM modelu celé štoly a později i jednotlivých experimentů. Klíčové bylo identifikovat, které prvky mají být modelovány a jak. Vznikl tak jedinečný standard pro BIM model podzemního díla, který vychází z mezinárodně uznávaného datového modelu IFC (Industry Foundation Classes, ISO 16739). Prvky obvyklé pro klasické pozemní stavitelství byly modelovány nástrojem Revit – světla, vypínače, rozvodné skříně, přenosná hasicí zařízení, potrubní systémy, záporové stěny, nosníky, schodiště. Štoly, resp. rozrážky byly modelovány jako polygonální sítě ve třech různých úrovních detailu. K nim byla využita kombinace nástrojů – Cloud Compare, MeshLab, AutoCAD a Geomagic Wrap. BIM model PL Josef je v aktuálně „digitálním kmenem“, který se dále větví a zpřesňuje pro různá užití. Zásadní zlom představuje projekt digitalizace pro plánování in-situ experimentů. K jejich provedení je často potřeba kombinace využití vrtné a stavební techniky. V BIM modelu lze dopředu provést analýzy přístupu a přesného umístění experimentu. Zařazením čtvrtého

rozměru, kterým je časová osa výstavby (následně i rozebrání) experimentu, vědecký tým získává unikátní pohled na průběh celého projektu. Simulace navíc graficky zobrazí rozdíly v plánovaném a skutečném provádění díla. V neposlední řadě BIM model experimentu slouží jako výchozí datový uzel provazující různé jiné datové zdroje. Příkladem je sensorika snímající hodnoty teploty uvnitř bentonitu. Každé teplotní čidlo má svůj obraz v elementu BIM modelu. Informace z čidel jsou ukládány do časové databáze naměřených hodnot. Každý element BIM modelu potom odkazuje na konkrétní časovou řadu hodnot příslušného čidla.

3.3.2 Univerzitní platforma JULBOT

Z robota se stává univerzitní platforma, která zahrnuje prostřednictvím robotů moderní nástroje Průmyslu 5.0 s důrazem na integraci autonomních robotických technologií. Jedna z konfigurací je určena k řešení náročných úkolů spojených s hloubkovým průzkumem, inspekcí a monitoringem staveb. Tím přispívá ke zvýšení bezpečnosti a efektivity pracovních procesů. Průzkumy a kontroly tak lze provádět v prostředích, která jsou pro člověka obtížně přístupná a nebezpečná. JULBOT ver 1.0 se od obdobných robotických systémů odlišuje vysokou robustností a odolností vůči extrémním vnějším podmínkám (Obrázek 7). Flexibilní konfigurace umožňuje doplnit platformu podle typu konkrétní prováděné činnosti. Platforma pro svůj pilotní provoz využívá digitální model Podzemní laboratoře Josef.



Obrázek 7 – JULBOT ver 1.0 – robustní stroj určený pro výuku, výzkum a vývoj v oblasti automatizovaného monitoringu nejenom podzemních staveb.

3.3.3 Vývoj autonomního nakladače pro podzemní stavby

Poskytovatelem podpory pro projekt je Ministerstvo průmyslu a obchodu (kód projektu CZ.01.01.01/01/24_063/0006805) v rámci programu Operační program Technologie a aplikace pro konkurenceschopnost (výzva III. – DEEP TECH). Cílem projektu je vývoj autonomního elektrického smykem řízeného stroje pro podzemní stavby, který bude schopen navigace v prostředí bez GPS. Projekt reaguje na potřeby důlního a stavebního průmyslu, kde je kladen důraz na zvýšení bezpečnosti práce, efektivitu operací a snížení nároků na lidské zdroje v nebezpečných podmínkách podzemního prostředí. Hlavním cílem je vytvoření systému autonomního řízení, který využívá 3D modely prostředí získané ze sensorů stroje a pokročilé algoritmy umělé inteligence. Klíčové aktivity zahrnují vývoj lokalizačních algoritmů, plánování trajektorie, integraci sensorických modulů a testování prototypu v reálných podmínkách v Podzemní laboratoři Josef. Projekt má za cíl nejen technologické inovace, ale také významné přínosy pro společnost. Mezi ně patří zlepšení bezpečnosti práce díky eliminaci přítomnosti lidí v rizikovém prostředí, podpora udržitelnosti díky elektrickému pohonu a snížení emisí, zlepšení pracovních podmínek operátorů a rozvoj dovedností pracovníků prostřednictvím nových technologií (FSv ČVUT 2026). Hlavní řešitelem projektu je firma First Green Industries a.s. a projektu se za Fakultu stavební ČVUT v Praze účastní Experimentální centrum a Centrum experimentální geotechniky. Spoluřešitelem projektu je Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky, konkrétně oddělení Vestavěných systémů a Testbed pro Průmysl 4.0. Na Obrázek 8 je dálkově řízený nakladač firmy First Green Industries a obrázek z testování v podzemí.



Obrázek 8 – Vývoj autonomního nakladače probíhá ve spolupráci s českou firmou First green industries, která dodává elektricky poháněné stroje do celého světa.

4. ZÁVĚR

Podzemní laboratoř Josef si během osmnácti let provozu vybudovala pevné místo mezi pracovišti zaměřenými na geotechniku, podzemní inženýrství, výzkum hlubinného ukládání radioaktivních odpadů atd. Mezinárodní spolupráce, včetně nového partnerství s korejskou podzemní laboratoří KURT, kterou provozuje Korea Atomic Energy Research Institute, potvrzuje význam laboratoře v oblasti ukládání radioaktivních odpadů. Současně se úspěšně rozvíjejí i nové směry výzkumu – ukládání energie. Zapojení do Národního centra stavebnictví 4.0 přineslo výrazný impulz pro rozvoj témat spojených s digitalizací, automatizací a robotizací pro podzemní stavby. Rozvoj digitálních dvojčat, autonomních strojů i univerzitního robota JULBOT ukazuje, že laboratoř směřuje i k technologiím budoucnosti. Důležitou součástí zůstává i vzdělávání – do odborných projektů jsou zapojeni studenti z ČR i zahraničí. Podzemní laboratoř Josef tak nadále plní roli dynamického výzkumného a výukového centra, které dokáže reagovat na aktuální potřeby moderního stavebnictví i energetiky a přispívá k rozvoji nových technologií v podzemním prostředí. Velice důležité je zapojení veřejnosti formou odborných prohlídek. V roce 2025 navštívilo pracoviště více než 3000 lidí včetně studentů. Univerzitní projekt Podzemní laboratoře Josef různou formou podpořili nejenom lídři českého stavebnictví jako např. Metrostav či Hochtief, ale také např. Ministerstvo průmyslu a obchodu, Ministerstvo životního prostředí, SÚRAO, Středočeský kraj a další.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří především kolegům z Centra experimentální geotechniky a dalších částí ČVUT v Praze. Prezentované projekty jsou spolufinancovány a) se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programů Théta 2 - Druhá veřejná soutěž (Horninová akumulace sezónního tepla (RASH, TAČR – TS01030218) a Inovativní systém pro ukládání tepelné energie na bázi recyklovaných odpadních surovin (INTES – TAČR - TS01030096)) a Sigma DC 4 - Bilaterální spolupráce (Optimalizace materiálů a technologií pro ukládání radioaktivních odpadů v hlubinných úložištích (TQ16000084)); b) Ministerstvem průmyslu a obchodu v rámci programu Operační program Technologie a aplikace pro konkurenceschopnost (výzva III. – DEEP TECH (Autonomní nakladač pro podzemní stavby - kód projektu CZ.01.01.01/01/24_063/0006805)); c) Správou úložišť radioaktivních odpadů SÚRAO, která je významným partnerem ve výzkumu.

Poděkování patří také Národnímu centru stavebnictví 4.0 a průmyslovým partnerům (Metrostav, Hochtief, SUDOP Group, INSET, Keramost, First Green Industries, Hilti, Kuka, SATRA, AFRY, Mott MacDonald CZ, UJV, Energoprojekt atd.

LITERATURA

SVOBODA, Jiří, Jan SMUTEK a Jiří ŠTĚASTKA. *The study of gas migration in crystalline rock using injection tests*. 2012. Dostupné také z: <https://knihovna.geology.cz/Carmen/cs/detail/103525>

MORÁVEK, Petr a et AL. *Zlato v Českém masivu*. 1. vyd. Český geologický ústav, 1992. ISBN 80-7075-088-X.

SMUTEK, Jan, Jaromír AUGUSTA a Lukáš VONDROVIC. *Bukov URF - A generic laboratory for the support of the deep geological repository project* [online]. In: . 2020, s. 1 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/359397006_Bukov_URF_A_generic_laboratory_for_the_support_of_the_deep_geological_repository_project

DVOŘÁKOVÁ, Markéta, Irena HANUSOVÁ, Jiří SVOBODA a Marek VENCL. *Experiment EPSP – Stavba zátky pro hlubinné úložiště radioaktivních odpadů v rámci evropského projektu DOPAS*. 2014. Dostupné také z: https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2014/2/tunel_2_14-04.pdf

SVOBODA, Jiri, Lucie HAUSMANNOVA, Radek VAŠÍČEK, et al. *Deliverable no. D4.7 - EPSP summary report: DOPAS (Contract Number: FP7 - 323273)* [online]. ČVUT v Praze, SURAO, UJV Řež, 2016, 102 s. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: http://www.posiva.fi/files/4394/DOPAS_D4_7_EPSP_Summary_Report_v19c.pdf

Průběžná zpráva o realizaci projektu TS01030218 za rok 2025. 2026.

Dílčí odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za 1-12/2025 TS01030096: Inovativní systém pro ukládání tepelné energie na bázi recyklovaných odpadních surovin. 2026.

Ing. Jiří Štěastka, Ph.D.

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky
jiri.stastka@fsv.cvut.cz

Ing. Jiří Bendl

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky
jiri.bendl@fsv.cvut.cz

Ing. Arch. Zdeněk Rudovský Ph.D.

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky
zdenek.rudovsky@cvut.cz

Ing. Martina Kulíková

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky
martina.kulikova@fsv.cvut.cz

Ing. Jiří Svoboda, Ph.D.

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky
jiri.svoboda@fsv.cvut.cz

doc. Dr. Ing. Jan Pruška

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra geotechniky
jan.pruska@cvut.cz