

LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE



Konferenční sborník

Závěrečný konferenční sborník projektu GeoMAP

Dynamika a modelace procesu zatopení dolu v krajinách zatížených důlní činností v Sasku a severních Čechách

23. dubna 2021



1







Organizátor:

Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii Pillnitzer Platzer 3 01326 Dresden

Kontakt:

Maria Ussath +49 3731 294 1503 Maria.ussath@smul.sachsen.de

Stanovení cílů

Projekt GeoMAP vznikl v rámci kooperačního programu "Svobodný stát Sasko – Česká republika 2014–2020". Slouží k výměně zkušeností o geovědních metodách a modelování jako základu pro rozsáhlé úvahy v post-těžebních oblastech. Cílem čtyř projektových partnerů je využít nové impulsy ke zlepšení stanovení a vyhodnocení souborů dat, a tím i prognózy různých důsledků těžebního průmyslu. Studijní oblast představuje z provozu vyřazený uhelný důl v Lugau / Oelsnitz (Sasko) a povrchový důl v Mostě (Česko).

Projekt se zaměřuje zejména na vzájemnou vědeckou výměnu informací mezi projektovými partnery. Kromě toho je má zlepšit komunikaci mezi vědeckými institucemi, úřady a dalšími zařízeními a institucemi. K dosažení tohoto cíle se konají čtyři konference zaměřené na projektové partnery.

2 Téma tohoto sborníku:

Tento konferenční sborník byl vytvořen v průběhu závěrečné akce projektu GeoMAP. Závěrečná akce se konala dne 23. dubna 2021 coby online událost. Během závěrečných akcí představili interní projektoví partneři nejnovější stav znalostí na téma "Dynamika a modelování procesu zaplavování dolů v post-těžebních krajinách v Sasku a severních Čechách". Externí odborní řečníci rozšířili předmětnou oblast na bývalé nebo stále nedostatečně vytěžené oblasti v Sársku nebo Porúří.

Financování

GeoMAP je mezinárodní projekt podporovaný Evropským fondem pro regionální rozvoj (ERDF) a státními fondy Svobodného státu Sasko z programu na podporu přeshraniční spolupráce mezi Svobodným státem Sasko a Českou republikou 2014–2020, registrovaný pod číslem 100348899.









Zúčastnění projektoví partneři

Do projektu GeoMAP jsou zapojeny Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii (LfULG), Technická univerzita v Ostravě a TU Báňská akademie Freiberg. TU Báňskou akademii Freiberg reprezentuje Katedra technické termodynamiky a Katedra hornin, mechaniky a stavby hornin.

Leadpartner (LP): Sasky zemsky uřad pro životni prostředi, zemědělstvi a geologii (LfULG)

LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE



Projektovy partner 1 (PP1): Technicka univerzita Baňska akademie Freiberg (TU BAF)



Projektovy partner 1a (PP1a): Technicka univerzita Baňska akademie Freiberg (TU BAF) Ustav geotechniky



Projektovy partner 1b (PP1b): Technická univerzita Báňská akademie Freiberg (TU BAF) Institut tepelného inženýrství a termodynamiky



Projektovy partner (PP 2): Vysoka škola baňska – Technicka univerzita Ostrava

VŠB TECHNICKÁ |||| UNIVERZITA OSTRAVA











5

Obsah

- 1. Aktualizace 3D podzemního modelu Lugau / Oelsnitz
- 2. Numerická simulace výzdvihu terénu nad zatopenými uhelnými doly v místě 19 starého důlního díla na příkladu bývalého černouhelného revíru Lugau Oelsnitz
- 3. Využívat geotermální energii dolu jako inovativní zdroj energie v post-těžebních 35 oblastech
- 4. Využití vybraných metod geotechnického monitoringu v polních podmínkách 48
- 5. Zkušenosti se vzestupem hladiny vody po odstavení černouhelné těžby ve 59 společnosti RAG AG
- 6. Přeshraniční sledování vzestupu hladiny důlní vody v bývalém uhelném dole v 66 Sársku a Lotrinsku
- Zkušenosti z modelové technické podpory zaplavení bývalého uranového dolu 74 Königstein









Aktualizace 3D podzemního modelu Lugau / Oelsnitz

S. Hädecke, R.A. Oeser, A. Rommel, M. Ussath, M. Hübschmann Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii

Abstrakt

Pro vizualizaci geologicko-strukturního podloží i pro prognózu důsledků těžby je nezbytné vycházet z údajů z doby aktivní těžby a jejího pozastavení. To platí zejména pro bývalý revír Lugau / Oelsnitz jihozápadně od města Chemnitz v Sasku. V této oblasti se těžilo černé uhlí v letech 1844 až 1971, přičemž těžební provoz ovlivňovaly nejvíce komplikované geologické a tektonické podmínky [Felix & Berger 2010]. Tyto přírodní podmínky, nedávné zdvihy a poklesy z post-těžebního období a omezené možnosti monitorování procesu zaplavení v důlním díle ztěžují zpracování dat, jež slouží pro hydrogeologický 3D model těžby. Na jedné straně má tento model sloužit k vizualizaci strukturních složek v podloží, na straně druhé má být v budoucnu použit jako geometrický základ pro geohydraulickou simulaci spolehlivých předpovědí stálého vzestupu hladiny důlní vody v revíru Lugau / Oelsnitz. Datovou základnu pro modelování tvoří přibližně 300 vrtů a šachet, systém těžařské výkresové dokumentace a analýza poškození při těžbě. Novější výzkumy, jimiž jsou geofyzikální měření a hydrogeochemické analýzy, jsou také k dispozici coby základ pro vytvoření geohydraulické simulace. Tyto studie již byly publikovány v publikaci Hädecke a spol. [2019]. Předkládaná práce se do hloubky zabývá zpracováním dat z vrtů, důlních dokumentací a těžařské výkresové dokumentace a na základě těchto zdrojů se zabývá přístupy k optimalizaci modelu. Nakonec je uveden výhled na nutnou další práci LfULG na analýze rizik procesu obnovy v černouhelné post-těžební oblasti Lugau / Oelsnitz nad rámec projektu GeoMAP.

1 Strukturně-geologické podloží Lugau / Oelsnitz a jeho ovlivnění uhelnou těžbou

Bývalý revír Lugau / Oelsnitz se nachází v chemnitzké pánvi, což je intramontanní pánev vytvořená během vzniku variského horstva (viz obrázek 1). Během sedimentace byla oblast formována několika příkopovými strukturami, které tektonicky rozdělovaly sedimentační prostory a tím i oblasti tvorby slojí.

Karbonské jednotky obsahující uhlí leží v této oblasti pod nadložní vrstvou rotliegendských sedimentů mocných až 1200 m [Felix et al. 2007]. Shrnuto, uhelný revír Lugau / Oelsnitz se vyznačuje velkými hloubkami těžby, složitými tektonickými zlomy a velkým počtem hydraulicky účinných geologických a hydrogeologických jednotek a struktur.











Obrázek 1: Umístění zkoumané oblasti, upravené dle [Lange 1998].

V průběhu černouhelné těžby v Lugau / Oelsnitz měly tyto komplikované podmínky zásadní vliv na průběh těžby, a tím i na pokles nadloží a povrchu. Oblast prošla v průběhu aktivní těžby a v době posttěžební řadou nežádoucích procesů, jako je deformace terénu se zápornými a kladnými hodnotami, jejichž příčinu lze vysledovat zpět k těžebnímu procesu. Rozhodující roli při tom hraje také proces rekuperace důlní vody, který probíhá ve fázi ukončení těžby po zastavení odvodňování. Interakce těchto příčin vede k naléhavé potřebě opatření pro zasažené obce, úřady a odborníky z oblasti vědy a průmyslu, tak, aby bylo možné včas posoudit možné důsledky, jako je např. vytvoření mokřadů.

Shrnutí nejdůležitějších studií a projektů od ukončení uhelné těžby v Lugau / Oelsnitz lze najít v projektovém sborníku GeoMAP [Rommel et al. 2021]. Součástí těchto šetření je projekt EU GeoMAP [Hädecke et al. 2019]. V rámci tohoto projektu, v němž se sdílejí zkušenosti, pracují Geotechnický institut (TU Báňská akademie Freiberg) a LfULG společně na geologickém, hydrogeologickém a geomechanickém modelování, vizualizaci a předpovědi pro zkoumanou oblast Lugau / Oelsnitz.

2 Databáze

Datový podklad pro strukturně-geologický prostorový model [Steinborn 2005] tvoří následující zdroje, které byly podrobněji zkoumány LfULG jako součást projektu GeoMAP:

- Analýza škodlivých následků těžby pro oblast Lugau / Oelsnitz [Beyer 1974]
- Těžařská projektová dokumentace
- Registry vrstev a dokumentace k archivním dokumentům vrtů a šachet
- a předběžné geologické práce (Steinborn [2005] a Felix et al. [2007])

3 Datové rešerše a dokumentace

Do rozsáhlých rešerší oblasti Lugau / Oelsnitz byla v rámci práce na projektu GeoMAP zahrnuta následující místa, kde se nacházejí archivy:

- Saský státní archiv, Oddělení 5 Hornický archiv Freiberg
- Hornické muzeum Oelsnitz /Erzgebirge









- Saský báňský úřad Freiberg
- Archiv LfULG

Nalezená metadata archivního materiálu byla systematicky zaznamenávána a část z nich, jež byla klasifikována jako přímo relevantní pro další práci v projektu GeoMAP, byla digitalizována a v případě potřeby georeferencována.

Základní databáze v GeoMAP a postup, stejně jako výsledky datové rešerše na uvedených stanovištích, budou podrobněji diskutovány v konečném projektovém sborníku GeoMAP (zveřejněn bude v červnu 2021).

4 Strukturně-geologický prostorový model Lugau / Oelsnitz

Stávající geologicko-strukturální 3D model oblasti Lugau / Oelsnitz byl vytvořen v letech 2003 až 2005 pomocí softwaru GOCAD[®] [Paradigm Geophysical Corp.] v rámci interního výzkumného projektu LfULG na téma "tektonika a struktura permokarbonů" [Steinborn 2005]. Obsahuje kvartérní, rotliegendské a karbonské geologické útvary, jakož i horní hranici fylitického podloží. Geologické hranice existují v modelu jako takzvané *surfaces*. Jedenáct relevantních střižných zón, které rozdělují ložisko uhlí na tektonické bloky, je v modelu zobrazeno formou ploch. Součástí modelu jsou dále vrty a šachty použité pro modelování, stejně jako část důlních vykopávek (obrázek 2).



Obrázek 2: Dojmy z 3D modelu GOCAD dle Steinborna [2005]. A Geologické jednotky coby schéma bloků, B: hranice horních vrstev (bez horní části terénu) geologických jednotek a čtyři významné střižné zóny (červená), C: vrty (modrá), šachty (oranžová) a těžební vykopávky (žlutá) zaznamenané v modelu, D: oblasti, které zobrazují uhelné sloje a dvě měřicí stanoviště důlní vody v Oelsnitzu (SW) a Gersdorfu (NE).

Stávající 3D model tak umožňuje přehled komplikované strukturní geologické konstrukce zkoumané oblasti a oblastí, které byly příliš zatíženy těžbou. V průběhu šetření, která byla shrnuta ve zprávě o stavu [Felix a kol. 2007], byl tehdy na základě své struktury použit tento model k vytvoření modelu vzestupu hladiny důlní vody [Felix et al. 2007]. Výsledné scénáře vzestupu hladiny důlní vody jsou založeny na modelu ve formě boxu [Eckart & Unland 2005] a mají být použity pro prognózy a plánování opatření na ochranu před škodami následkem těžby způsobenými stoupající hladinou důlní vody. Zároveň byly Informace získané z modelu použity pro numerické modelování poklesů v Institutu pro mechaniku hornin u TUBAF - projektového partnera GeoMAP. Ukázalo se však, že současný 3D model splňuje požadavky na prognózu zaplavení a numerické modelování pouze z části. Není například možné lokalizovat zbytkové dutiny v bývalých těžebních polích, jelikož model nezaznamenává místní objemy důlního zásypu. Místo toho byl vklad diferencován na modelu ve formě boxu, do nějž byly integrovány zaplavitelné zbytkové dutiny [Eckart & Unland 2005]. V oblasti rotliegendských formací je znázorněno dělení na formace Mülsen-Leukersdorf, Planitz a Härtensdorf. Ty však neodrážejí různé hydraulické vlastnosti těchto horninových sekvencí, které může obecně rotliegend ukázat [srov. Kollitsch 2008]. Pro transportní modelování vzestupu hladiny důlní vody by bylo užitečné diferencované dělení.



7







5 Stěžejní oblasti zpracování v GeoMAP

V rámci technické práce LfULG v projektu GeoMAP byl výzkum a dokumentace výchozích dat zaměřen na zkoumanou oblast Lugau / Oelsnitz. V předchozích studiích [Steinborn 2005; Felix et al. 2007] byla sice použitá data vysvětlena, avšak mnoho meziproduktů a meta informací pro digitalizaci a modelování již nebylo k dispozici. Aby bylo možné 3D model ověřit, bylo nutné určit původ výchozích dat a znovu zkontrolovat jejich přenos do 3D. Kvůli chybějící dokumentaci metadat, zejména při použití archivních podkladů, bylo toto při rešerších spojeno s obrovským úsilím. Kontrola, která následovala po sběru dat, byla provedena v následujících krocích:

Krok 1: Souhrn a dokončení všech vrtů a šachet z informační databáze ve zkoumané oblasti

V následující části je stručně popsán postup počátečního porovnání dat popř. získání dat z informační databáze LfULG.

Nejprve byly vrty a šachty uvedené v příloze 16 Felixe a kol. [2007] v systému ArcGIS znázorněny coby bodová data a následovalo zásadní porovnání informací ve zprávě o stavu [Felix a kol. 2007] s daty prostřednictvím systému GeODin s ohledem na horní a dolní hodnoty, horní hranu terénu a konečnou hloubku vrtů. Pokud byla data k dispozici, byla do souboru dat přidána další vrstva dat z centrální informační databáze LfULG. Další vrty a šachty, které dosahují hloubky 50 m, po roce 2007 zčásti zaplavené, obsahují informace o vrstvách a díky těmto podmínkám je lze použít k vylepšení 3D modelu, byly přidány do souboru dat (obrázek 3). Horizonty "uhelné sloje" zobrazené v systému GeODin by měly být přesněji specifikovány v dalším kroku. Za tímto účelem byly porovnány hloubkové informace o slojích (uložené v ArcGISu jako soubory tvarů a / nebo jako georeferencovaná rastrová data), aby bylo možné přiřadit uhelným slojím (např. Floez_Haupt pro hlavní sloj) odpovídající označení. To byl důležitý krok k ověření a případně úpravě informací o těžebních oblastech v přehledových plánech, které byly použity pro modelování GOCAD.

Za tímto účelem byla pro srovnání a pojmenování horizontů použita také základní mapa zásob černého uhlí [Těžební společnost Oelsnitz výsledně 1948]. Kromě toho bylo pro doplnění informací v informační databázi použito 9 profilů šachet z archivů hornického muzea. Tyto profily (viz tabulka 1) se obvykle zabývaly úsekem od rotliegendského podloží ke spodní části šachty, který částečně dosáhl na vrchol podloží.

Označení profilu šachty	Rok vzniku	Autor
Šachta Hedwig-Schacht	1932	Těžební společnost Odbory Německo
Šachta Helene-Schacht	1932	Těžební společnost Odbory Německo
Šachta Ida-Schacht	1932	Těžební společnost Odbory Německo
Šachta Friedenschacht	1930	Těžební společnost Odbory Německo
Šachta Deutschland-Schacht I	1932	Těžební společnost Odbory Německo
Šachta Deutschland-Schacht II	1932	Těžební společnost Odbory Německo
Šachta Vertrauen-Schacht	1938	Těžební společnost Arnold
Továrna K. Liebknechta v Oelsnitzu	1946	Těžební společnost Karl-Liebknecht-Werk
Šachta Vereinglück-Schacht I	1882/1929	Těžební společnost Odbory Německo
Šachta R Breitscheid-Schacht	k. A.	Těžební společnost Odbory Německo
– není implementováno		
Šachta Glück-Auf-Schacht – není	1897	Uhelný revír Boží požehnání (Gottes Segen)
implementováno		

Tabulka 1: Přehled použitých šachtových profilů z obsahu archivu Hornického muzea.



8







Uhelné sloje byly v těchto profilech konkrétně označeny a velmi podrobně (s jednotlivými uhelnými vrstvami a mezivrtsvím) zobrazeny. Profily šachet tak nabídly doplnění výchozích dat v databázi LfULG, ve kterých tyto informace dříve chyběly.

Během tohoto pracovního procesu vyšlo najevo, že rozlišení slojí s ohledem na jejich hloubku a mocnost uhelných vrstev a mezivrství v profilech šachty je obvykle mnohonásobně vyšší než v systému GeODin. Je však třeba vzít v úvahu, že podmínky uvedené v archivních dokumentech kvůli změnám v podloží v průběhu těžby a po těžbě (pokles a zdvih terénu, prohýbání v zónách uvolnění atd.) již neodpovídají současnému stavu. Z tohoto důvodu nejdou zejména hloubky bez omezení extrahovat ze zdrojů.



Obrázek 3: Hornický revír Lugau / Oelsnitz (oranžová) s vrty a šachtami (černá) již zaznamenanými v 3D modelu a s vrty a šachtami (zelená) vhodnými k implementaci. Černé čáry symbolizují průběh hlavních zlomů v oblasti.

Krok 2: Srovnání map rozšíření slojí již zpracovaných v systému GIS s naskenovanými georeferencovanými přehledovými plány

Z předchozích studií [Felix a kol. 2007] existují soubory GIS pro revír Lugau / Oelsnitz, které obsahují georeferencované informace souhrnného plánu o rozšíření, hloubce a mocnosti těžených slojí. Kromě úklonu a typu zakládky byly informace již digitalizovány během vytváření původního modelu a uloženy ve formě georeferencovaných tvarových souborů, které lze číst pomocí programů GIS (obrázek 4). Také výkresová dokumentace průběhu střižných zón byla digitalizována a uložena v 3D modelu GOCAD jako množství bodů [Steinborn 2005]. Před použitím pro aktualizaci 3D modelu byla zkontrolována jejich správnost. Při prohlížení původního 3D modelu bylo zřejmé, že se "surfaces" (povrchy) založené na









přehledových plánech, které zobrazují základ slojí, překrývají. Prostorové překrývání postupně ukládaných černouhelných slojí nemá stratigraficky smysl, ale vyskytuje se na velké ploše modelu GOCAD od Steinborna [2005]. K tomu je třeba poznamenat, že podrobná reprezentace slojí nebyla nikdy cílem původního modelování. Interpolace během modelování navíc vždy zjednodušuje referenční data, v důsledku tak může dojít k takovýmto překrývajícím se efektům.

Další příčina byla očekávána v primárních datech přehledového plánu nebo v souborech GIS, a proto byly oba formáty navzájem srovnávány. Za tímto účelem byly naskenované originály ořezány a georeferencovány.

V následném srovnání byl v atributech sloje "Vertrauen" nalezen systematický náznak chyby informací o nadmořské výšce, kterou však bylo možné napravit. Kromě toho bylo možné potvrdit správný přenos informací z přehledového plánu do GIS. Důvod překrytí slojí je tedy třeba najít v přenosu primárních těžebních dat (2D) do trojrozměrného prostoru. Množství bodů, které představuje rozšíření a hloubku sloje, neposkytuje dostatečné informace o četných zlomech, posunech a erozních oblastech, které jsou pro těžební oblast těžby Lugau / Oelsnitz charakteristické. Z tohoto důvodu nejsou přehledové plány (nebo obecné důlní plány) dostatečným základem pro vizualizaci slojí v oblasti.



Obrázek 4: 8 desek výkresové dokumentace pro základní sloj z přehledového plánu Lugau / Oelsnitz [inventář SächsStA-F 40120], rozřezaných a georeferencovaných.

Krok 3: Porovnání vrtů a šachet s profilovými řezy [Felix et al. 2007]

Tento krok byl proveden za účelem získání více informací o postupu počátečního vytvoření 3D modelu. K tomuto účelu byly použity tři příkladové geologické řezy oblasti, které odpovídají přílohám 5, 6 a 25 hodnotící zprávy [Felix a kol. 2007] (obrázek 5). Řezy zobrazují geologické podmínky v oblasti modelu









dvourozměrně a jsou tak vizuálním mostem mezi dostupnými průzkumnými daty a 3D modelem. Pomocí geologických řezů by měly být k jednotlivým horizontům sloje přiřazeny značky s označením "uhelná sloj" a v dalším kroku by měla být ověřena věrohodnost 3D modelu.



Obrázek 5: Červeně umístění geologických řezů A (Felix et al. 2007, příloha 5) a B (příloha 6) v těžební oblasti (zdroj: Felix et al. 2007, příloha 17 modifikována).

Jednotlivé litologické jednotky karbonu nejsou bohužel v geologických řezech konzistentně pojmenovány, takže jsou zahrnuty pouze informace o vyobrazených šachtách a stratigrafických jednotkách, nikoli však o názvech jednotlivých uhelných slojí. Přidělení těles slojí bylo proto možné pouze částečně a pouze v bezprostřední blízkosti šachet. Intenzivní tektonická fragmentace podél jednotlivých profilů způsobená zlomy procházejícími oblastí znemožňovala důsledné a spolehlivé sledování slojí (obrázek 6).











Obrázek 6: Geologický řez A, podle přílohy 5 (zdroj: Felix et al. 2007, modifikováno). P1Lk - formace Leukersdorf, P1Pn - formace Planitz, P1Ht - formace Härtensdorf, C - svrchní karbon, O - ordovik, zde: fylitické podloží. Schacht = Šachta; Verwerfung = Deformace; m ü. HN = Metry nad mořem; Störung = Zlom; GWM = místo měření podzemní vody.

Krok 4: Porovnání profilů s existujícím 3D modelem

12

V tomto pracovním kroku bylo ověřeno, do jaké míry je 3D model věrohodný i v oblastech s nízkou hustotou podpěrných bodů. Za tímto účelem byly obnoveny tři výše zmíněné geologické úseky z hodnotící zprávy [Felix et al. 2007] a analogové profily (tzv. *"crossplots"*) vytvořené 3D modelem pomocí softwaru GOCAD. Polohu geologických řezů ve 3D modelu lze vidět na obrázku 7.



Obrázek 7: Poloha geologických řezů A (Felix et al. 2007, příloha 5), B (příloha 6) a profilu 8 (příloha 25) ve skutečném měřítku ve 3D modelu. Fialový: Surface (povrch) horního okraje fylitického podloží ke srovnání.

Pro lepší ilustraci byly *"crossplots"* (obrázek 8A) založeny na vybarvení geologických řezů ze zprávy o stavu [Felix et al. 2007] (viz obrázek 8B). S tímto krokem zpracování bylo možné porovnat konečně geologické řezy přímo s 3D modelem, určit rozdíly a formulovat možnosti korekce. Předpokládalo se,









že geologické řezy představují podložní podmínky podél profilových čar a jsou vhodné jako reference pro 3D modelování.

Geologický řez A [Felix et al. 2007, příloha 5]: Ve 3D modelu klesá horní hrana fylitického podloží severozápadně od zlomu Ida-Glückauf strměji, což podle geologického řezu neplatí (viz obrázky 6 a 8B). Modelovaný výskyt zlomů řezu neodpovídá výskytu v řezech. Na východ od zlomu šachty Pluto je v 3D modelu mezera mezi stratigraficky nadbytečnými surfaces (povrchy) karbonské báze (značka C a vrchní fylit (značka O). Z crossplotu Ize odvodit, že povrchový fylit odpovídá skutečné stratigrafické hranici. Tuto odchylku Ize najít také v informačních datech, kde byla eliminována pomocí šachtových profilů z archivu hornického muzea. V této oblasti je nutná odpovídající revize hranice mezi karbonem a podložní horninou (fylitem) ve 3D modelu.



Obrázek 8A: Export crossplotu ze systému GOCAD -analogický geologické sekci A [Felix et al. 2007, příloha 5]. **Obrázek 8B:** barevně upravený crossplot pomocí modelu GOCAD analogický geologickému řezu A. Legenda: P1Lk - formace Leukersdorf, P1Pn - formace Planitz, P1Ht - formace Härtensdorf, C - svrchní karbon, O - ordovik, zde: fylitický suterén. Verwerfung = Deformace; m ü. HN = Metry nad mořem; Störung = Zlom; GWM = místo měření podzemní vody; NW = SZ; SE = JV.









Geologický řez B [Felix et al. 2007, příloha 6]: Ve srovnání mezi geologickým řezem a crossplotem systému GOCAD je patrné, že četné posuny, které procházejí geologickými jednotkami, zejména severovýchodně od Rödlitzer Sprung, nejsou v 3D modelu implementovány (obrázek 9). V původním 3D modelu od Steinborna nebyly do modelování zahrnuty všechny zlomy zobrazené v geologických řezech. To je pravděpodobně způsobeno tehdejším zevšeobecňujícím cílem modelování. Software GOCAD[®] [Paradigm Geophysical Corp.] je navržen pro obzvláště hladké modelování surfaces (povrchů) a pro vyrovnání silných výškových posunů na krátkou vzdálenost za předpokladu, že předem nebyla provedena výslovná manuální definice tektonických posunů. Tím se vytvoří jasný rozdíl mezi geologickými řezy a GOCAD crossploty.



Obrázek 9A: Geologický řez B, podle přílohy 6 (zdroj: Felix et al. 2007, modifikováno). **Obrázek 9B:** Průřez modelem GOCAD analogicky s geologickým řezem B, barevně upraven. Legenda: P1Ms – formace Mülsen, P1Lk – formace Leukersdorf, P1Pn – formace Planitz, P1Ht – formace Härtensdorf, C - svrchní karbon, O - ordovik, zde: fylitické podloží. Schacht = Šachta; Sprung = Skok; Verwerfung = Deformace; m ü. HN = Metry nad mořem; Störung = Zlom; GWM = místo měření podzemní vody; WSW = ZJZ; ENE = VJV.

Geologický řez **8** [Felix et al. 2007, příloha 25]: Také zde je patrné, že posun podél Rödlitzer Sprung, který podle zprávy o stavu [Felix et al. 2007] dosahuje až 350 m, byl v GOCAD *crossplotu* na levé a pravé straně vyhlazen (obrázek 10). Zdá se, že formace Planitz (P1Pn) přibírá v jihozápadní části Rödlitzer Sprung ve 3D modelu na mocnosti, což nelze v geologickém řezu 8 vysledovat.













Obrázek 10A: Geologický řez 8, podle přílohy 25 (zdroj: Felix et al. 2007, modifikováno). **Obrázek 10B:** Průřez modelem GOCAD - analogicky s geologickým řezem 8, barevně upraven. Legenda: P1Lk - formace Leukersdorf, P1Pn - formace Planitz, P1Ht - formace Härtensdorf, C - svrchní karbon, O - ordovik, zde: fylitické podloží. Schacht = Šachta; Sprung = Skok; Verwerfung = Deformace; m ü. HN = Metry nad mořem; Störung = Zlom; GWM = místo měření podzemní vody.

U všech tří rovin řezu v 3D modelu je vidět, že různé povrchy slojí probíhají nad a pod karbonskou plochou popř. bází, což je geologicky nesprávné. Tento problém může být vyřešen opravou výše popsané karbonské báze.

Krok 5: Rekonstrukce procesu modelování podle Steinborna [2005] na vybraných geologických

prvcích

Proces počátečního modelování byl reprodukován na příkladu překrývající se Kneiselovy sloje, Základní sloje a Hlavní sloje. Jak popisuje Steinborn [2005], bylo k tomu účelu do systému GOCAD importováno množství bodů rozšiřovacích map slojí a každému bodu byla přiřazena příslušná hloubka jako hodnota z. Poté byly, odlišně od pokynů Steinborna, pomocí příkazu *"Surface/ New/ Point Set Medium Plane"* vygenerovány *"surfaces"* (Povrchy) pro celou pracovní oblast. Pomocí příkazu *"Surface / Fit / to Point Set"* byla oblast poté upravena na množství bodů a jako poslední krok byly oblasti protnuty polygonovými obrysy importovanými ze systému ArcMAP. Výsledkem jsou 3D povrchy, které dobře odpovídají původně modelovaným 3D plochám v modelu. Stejně jako původní modelované sloje i nově modelované jednotky vykazují silné překrytí mezi Kneiselovou a Základní slojí a méně výrazné překrytí mezi Základní a Hlavní slojí (obrázek 11). To lze vysvětlit místně se vyskytujícími spoji slojí popř. malou vertikální vzdáleností někdy několik centimetrů až decimetrů mezi nadložními slojemi v oblasti (srov.









[Felix et al. 2007]). Rozlišení nebo velikost modelu není pro zobrazení těchto detailů vhodná. Kromě toho existují již zmíněné poruchy, které jsou dokumentovány také v šachtových profilech (tabulka 1), které vzájemně přesahují uhelné sloje a nejsou ve 3D modelu detailně vizualizovány.



Obrázek 11: Pracovní postup v systému GOCAD. A Importovaná sada bodů z přehledového plánu. Informace o výšce byly bodům přiřazeny jako hodnoty z. B: Z polygonu slojí a sady bodů se vytvoří povrch. C: Původní surface/povrch (modrý) a nově modelovaný surface/povrch (béžový) spodní sloje se vzájemně překryly.









Modelování objemů slojí na základě již existujících informací z přehledového výkresového plánu zřejmě v tomto okamžiku zpracování nedávalo smysl. Předtím, než bude možné modelovat těžební oblasti, které byly v původním modelu vynechány, bude nutné podle modelu zjednodušit karbonskou stratigrafickou sekvenci. Pro tento účel by měly být použity značky vrtů a šachet, které by kromě množství bodů z přehledového plánu měly plynout do modelování uhelných slojí coby primární data.

6 Doporučení pro aktualizaci 3D modelu GOCAD

V průběhu výše popsaných výzkumů byly v některých případech zjištěny velké nesrovnalosti mezi jednotlivými zdroji (např. informační data a přehledový plán), ale také mezi počátečními údaji a 3D modelem. To vede k následujícím prioritám vylepšení 3D modelu:

- Přidání revidovaných informací o vrstvách pro všechny vrty a šachty, které jsou pro model relevantní jako značky v modelu
- Realizace cca 100 dodatečně vybraných vrtů a šachet
- Oprava lokálních nekonzistencí na hranicích formace v modelu, kde se vrstvy částečně překrývají nebo tvoří dutiny
- Koncept 3D vizualizace těžebních oblastí jednotlivých slojí
- Objemové modelování pro oblast Lugau / Oelsnitz pomocí pracovního postupu "Struktura a stratigrafie", včetně geologických jednotek, střižných zón a těžebních polí

7 Shrnutí a výhled pro další práci

Práce na 3D modelu Lugau / Oelsnitz, které jsou prováděny v rámci projektu GeoMAP, tvoří základ pro vylepšování modelu, zejména v oblasti karbonských vrstev. Výzkum a získávání dat, které byly prováděny v průběhu projektu, byly primárně zaměřeny na zdroje související s bývalou těžbou v této oblasti. V popsaných lokalitách, v nichž se nacházejí archivy, byly tyto informace bohatě k dispozici a v kontextu probíhajícího šetření důsledků těžby v této oblasti se zpracování jeví jako naprosto nezbytné. Data lze například použít k výběru dalších vhodných míst pro měřicí body důlní vody.

Obdobně rozsáhlý výzkum vrstev rotliegendu není stále dokončen. Ačkoliv jsou těžební pole z velké části zaplavena, přemístěna nebo zničena, dochází ve vrstvě rotliegendu k nárůstu hladiny důlní vody. Petrografická diferenciace a parametrizace rotliegendu by však byla velmi zajímavá pro prognózy dalšího průběhu zaplavování v oblastech blízko povrchu. V tomto ohledu byla zpráva o stavu [Felix a kol. 2007] založena na předpokladu, že skalní útvary rotliegendu jsou jako celek "hydraulicky těsné" [srov. Felix a kol. 2007, s. 98], je však třeba vzít v úvahu také lokálně odchylující se hydraulickou účinnost inventarizace zlomů. Jeho kontrola by měla být předmětem budoucích studií.









Literatura

Hornické muzeum Oelsnitz / Erzgeb., Základní mapa zásob černého uhlí. Těžební společnost Oelsnitz i.E.1948. Oelsnitz/Erzgeb.

Beyer, C.&. a. (1974): Analýza negativních důsledků těžby v "Lugau-Oelsnitz" - nepublikováno, stavba VEB v Berlíně, výrobní areál Zwickau a uhelné závody VEB Oelsnitz, Zwickau, archiv Vrchního báňského úřadu; Freiberg.

Eckart, M. & Unland, W. (2005): Vývoj modelu rekuperace důlní vody pro černouhelný revír Lugau / Oelsnitz, část 11. - nepublikovaná zpráva, DMT GmbH, Essen.

Felix, M. et al. (2007): Závěrečná zpráva. Důsledky těžby v bývalé černouhelné těžební oblasti Lugau / Oelsnitz se zvláštním zřetelem na zvýšení hladiny důlní vody. Nepublikovaná zpráva. Ve spolupráci H. J. Bergera, Saschy Görne, L. Assmanna, H. Steinborna, W. Alexowského, H. Schuberta et al. vyd. Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii. Freiberg

Felix, M. & Berger, H.-J. (2010): Těžba uhlí a důsledky těžby v černouhelné těžební oblasti Lugau / Oelsnitz. Článek v Geoprofil Vol. 13, Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii; Freiberg.

Fischer, F. (1991): Rotliegendy v oblasti východního Durynska-západního Saska (Podkrušnohoří-svah, severozápadní saský vulkanický komplex, gerská pánev) - Disertační práce TU Báňská akademie Freiberg. Freiberg.

Hädecke et al. (2019): Vizualizace a předpovědi důsledků těžby na příkladu vzestupu hladiny důlní vody v bývalé černouhelné těžební oblasti Lugau / Oelsnitz (Sasko). Ve spolupráci M. Ussatha, C. Jahnse a M. Hübschmanna. V: THGA Výzkumné středisko pro důsledky těžby (ed.): Konferenční sborník těžby, energie, surovin 2019. Přechod do nové doby. Ve spolupráci s Deutscher Markscheider-Verein e.V., těžba, energie, suroviny. Bochum.

Kolitsch, S. (2008): Hydrogeologická analýza a rozsáhlé modelování širší pánve Podkrušnohoří. Disertační práce Technická univerzita Báňská akademie Freiberg Freiberg

Lange, T. (1998): model tektonostratigrafické struktury v uhelném revíru Zwickau jako základ pro stanovení post-těžebního poškození - Diplomová práce, TU Báňská akademie Freiberg (nepublikováno). Freiberg

Rommel, A., Hädecke, S., Ussath, M. & Hübschmann, M. (2021): GeoMAP - geologické, hydrogeologické a geomechanické modelovací, vizualizační a prognostické nástroje ke znázornění důsledků těžby a potenciálů nového využití, číslo žádosti: Vyd. Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii; Technická univerzita Báňská akademie Freiberg; VŠB - Technická univerzita Ostrava. Freiberg

Saský státní archiv, Hornický archiv Freiberg, 40120 černouhelný podnik) "VEB Steinkohlenwerk Oelsnitz (Erzgebirge) und Vorgängerbetriebe", archivní dokumenty K66 až K73.

Steinborn, H. (2005): Aplikované modelování ve stěžejním projektu těžařských černouhelných revírů Zwickau a Lugau / Oelsnitz pomocí systému Gocad. Tektonika a stavební inženýrství permokarbonu Zwickau / Oelsnitz. Nepublikovaná zpráva. Saský Zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii. Freiberg.









Numerická simulace výzdvihu terénu nad zatopenými uhelnými doly v místě starého důlního díla na příkladu bývalého černouhelného revíru Lugau – Oelsnitz

G. Lüttschwager, F. Weber, H. Konietzky

TU Báňská akademie Freiberg, Institut geotechniky Gustav-Zeuner-Str. 1, 09599 Freiberg

Souhrn

Během posledních několika desetiletí byla uzavřena řada černouhelných dolů. Po zastavení odvodňování jsou tyto doly zaplaveny a hladina důlní vody stoupá. Toto zaplavení má obrovský vliv na životní prostředí. Jedním z aspektů je například deformace/výzdvih povrchu terénu v důsledku zaplavení stařin a nadloží. Doposud byly tyto procesy popsány téměř výlučně analyticky. Používané přístupy pro složitou geometrii dolu nebo složité geologické podmínky však obvykle nestačí. Pro bývalou uhelnou oblast Lugau-Oelsnitz v Sasku se vyvíjí vzorový trojrozměrný numerický model. Výzvou je zde omezená dostupnost datových záznamů pro staré důlní dílo a zjednodušené vytváření geometrie dolu. Kromě toho musí být identifikovány a vhodně implementovány relevantní mechanismy pro výzdvih. Prognóza rychlostí deformace/zdvih povrchu terénu využívá digitální geometrie slojí a aktuální měření výšky hladiny důlní vody. Představený kontinuální mechanický přístup k mapování procesů zdvihu terénu je vhodný pro doly s omezenými geomechanickými a hydraulickými informacemi. Výsledky simulace jsou v dobré kvalitativní shodě s pozorovanými údaji z měření nivelace a satelitním hodnocením zkoumané oblasti Lugau-Oelsnitz. Zde prezentovaná práce potvrzuje potřebu přesných znalostí o vyřazených uhelných dolech pro lepší posouzení rizik.

1 Úvod

Po uzavření černouhelných dolů je obvykle odvodnění zastaveno a jámy jsou zaplaveny, což vede k nárůstu hladiny důlní vody. Toto zaplavení s sebou nese řadu vlivů na životní prostředí, jako je například obecně zvyšování nestability důlního díla a zejména šachet, jakož i smísení povrchové podzemní vody se stoupající důlní vodou a související kontaminace podzemní vody. Kromě toho stoupající hladina důlní vody a související přerozdělování napětí v podloží způsobují deformace/zdvih na povrchu terénu. Tyto zdvihy byly pozorovány a popsány řadou vědců (Gee et al. 2016; Gee et al. 2017; Bekendam und Pöttgens 1995; Bekendam 2017; Heitfeld et al. 2014; Heitfeld et al. 2016a; Dudek et al. 2020). Výpočty a předpovědi rychlostí deformací/zdvihu terénu se zatím omezily hlavně na analytická řešení. Na druhou stranu jsou numerické simulační postupy v literatuře zastoupeny jen zřídka.

V rámci projektu GeoMAP financovaného Evropskou unií se vyvíjí přístup numerické simulace pro výpočet a předpovídání vzestupných účinků v důsledku nárůstu hladiny důlní vody. Jako příkladový objekt slouží ke zkoumání již nepoužívaná černouhelná těžební oblast Lugau-Oelsnitz v Sasku. Umístění a rozsah zkoumané oblasti jsou uvedeny na obrázku 1 Obrázek. Těžba byla zastavena v roce 1971 a důl byl nekontrolovatelně zaplaven. Konečnou analýzu poškození těžbou napsal Beyer (1974) . Doly byly zcela zasypány. V době odstavení areálu nebyla instalována žádná monitorovací zařízení a od té doby nebyla budova dolu přístupná. Výsledkem je, že z přímé post-těžební fáze neexistují žádné údaje o pohybech půdy ani o průběhu zaplavování. Novější šetření byla v této oblasti znovu prováděna od poloviny 90. let. Procesy deformace/zdvihu terénu byly zkoumány např.Löbel et al. (2015) a John









(2019). První numerická 2D simulace byla prezentována Löbel et al. (2015) . Nyní prováděná studie zahrnuje 3D výškové modelování.

Specifickým těžebním tématem šetření je vytvoření strategie modelování pro omezené množství dat. Hlavní výzvy tvoří příprava dat a zjednodušené vytváření těžebních geometrií a mechanismů souvisejících se zdvihem. Zde prezentovaná práce zahrnuje soupis srovnatelných studií, analytické zvážení procesů deformací/zdvihu terénu a přípravu monitorovacích dat. Nakonec je představena strategie numerické simulace a jsou diskutovány výsledky.



Obrázek 1: Přehledová mapa zkoumaného území s rozsahem modelové oblasti, umístěním nejdůležitějších lokalit, rozsahem těžby a umístěním měřicích bodů důlní vody.

2 Výpočet výzdvihu terénu nad opuštěnými uhelnými doly během jejich zaplavení

Stoupající hladina důlní vody a výsledný zvýšený tlak pórů u stařiny způsobí, že se stařina roztáhne a následně dojde k deformaci povrchu terénu. První analytický popis těchto procesů lze nalézt naPöttgens (1985). Podle této práce je zdvih nad zaplavenými uhelnými doly způsoben dekompresí a expanzí stařiny v důsledku změn napětí způsobených tlakem pórů. Přesný rozsah oblasti ovlivněné dekompresí je silně ovlivněn typem horniny, stupněm uvolnění a hydraulickými vlastnostmi okolního nadloží. Kromě oblasti stařiny může důlní voda ovlivňovat i nadzemní narušené oblasti nebo také části nadloží i celé nadloží. Příkladem těžební uhelné oblasti, která má také deformační účinky na zatopené nadloží, je oblast jižního Limburgu(Bekendam, 2017).









Přerozdělení napětí v zaplavené stařině působí ve formě vztlaku. Rovnice 1 popisuje tento vztah, kde σ je napětí, p je tlak vody a σ 'je efektivní napětí. Výsledný deformační efekt (vertikální expanze) zatopené stařiny lze popsat rovnicí 2.

$$\sigma' = \sigma - \rho \tag{1}$$

$$\Delta h = D_m h \Delta p \tag{2}$$

Rostoucí tlak důlní vody ΔP ve stařině vytváří převážně vertikální expanzi Δh zlomových hornin (mocnost h). Pro výpočet této svislé roztažnosti musí být extinkční koeficient Dm kalibrován pomocí naměřených údajů o deformacích. Povrchové deformace/zdvihy se skládají (v případě analytických přístupů) ze superpozice deformačního – zdvižného – účinku všech zaplavených oblastí. Horizontální expanzi a účinek jediného prvku stařiny na nadmořskou výšku terénu popisuje vlivová funkce kz. S jejich pomocí lze určit celkovou nadmořskou výšku pro konkrétní hladinu důlní vody integrací přes všechny těžební prvky (integrace přes celou oblast A) podle rovnice 3:

$$u_z = \Delta h \int k_z \, \mathrm{d} \, A \tag{3}$$

Stejně jako u analýz zlomů je obvykle definována další vodorovná mez, často ve formě kritického úhlu. Takovým horizontálně omezeným přístupem ke zdvihu je vlivová funkce Knothe (1984), která je založena na horizontálně exponenciálním rozpadu zdvihu až do definované vzdálenosti od oblasti těžby. Tato efektivní vzdálenost závisí na hloubce zatopené oblasti a mezním úhlu specifickém pro skrývku. Sroka und Preusse (2017) Tento přístup byl poprvé použit pro výpočty vztlaku kvůli vzestupu hladiny důlní vody. Obrázek ukazuje řešení zdvihu Sroka und Preusse (2017) pro jednoduchý syntetický model podloží.



Obrázek 2: Analytické řešení deformace/zdvihu povrchu pro zaplavení jednoduché geometrie zlomu podle Sroka a Preusse (2017). Hebung = Zdvih; Tiefe = Hloubka; Modellgeometrie = Geometrie modelu; Verbruchbereich = těžební oblast; Grubenwasserstand = Hladina důlní vody.

Kvůli jednoduchosti přístupů k řešení a zejména kvůli geometriím jsou tyto analytické úvahy vhodné pro zvážení složitých těžebních geometrií a komplikovaných geologických podmínek pouze v omezené míře. Rovněž není brán v potaz postupující proces nasycení u stařiny a přístup čisté superpozice není dostačující pro prudce klesající degradaci. Aby se předešlo těmto slabinám analytických přístupů, je součástí této práce představení numerického 3D modelu, s nímž lze zobrazit také složitější doly, které se nacházejí ve fázi zaplavování.









3 Geologie, těžba a monitorování

3.1 Geologie ve studované oblasti

Oblast výzkumu s bývalým černouhelným těžebním revírem Lugau-Oelsnitz se nachází v Podkrušnohorské pánvi, která je orientována severozápadně – jihovýchodně. Geologickou situaci formoval převážně variský orogén a s ním spojený vznik krystalického komplexu Krušných hor na jihovýchodě. Regionální geologie byla podrobně popsána např. v Berger et al. (2010) a v Felix et al. (2007). Prekarbonské podloží se skládá převážně z ordovických fylitů, jejich pokryv tvoří několik útvarů červené jaloviny, tzv. Rotliegendu. Pro tuto práci je k dispozici geologický model rotliegendu ve formě geologických horizontů. Sedimenty z třetihor a mladší sedimenty se vyskytují v dnešních údolích (tloušťka <10 m) jen sporadicky. Tato ložiska jsou většinou sypkými sedimenty a pro numerickou simulaci v této práci nebyla zohledněna. V důsledku vrásnění Krušných hor byla studovaná oblast charakterizována silnou tektonickou aktivitou až do třetihor. Zlomová aktivita skončila nejpozději v třetihorách.

Pro numerickou simulaci výkyvů způsobených důlní vodou mají rozhodující význam hydraulické vlastnosti těžební nebo zlomové oblasti a nadloží. Rotliegend, nacházející se blízko povrchu a post-rotliegend mají vysokou až velmi vysokou propustnost v horní části 50–70 m. Cesty se vyznačují zlomovými cestami a obecným zvětráváním rotliegendu. Pod touto erozní vrstvou se rotliegend vyznačuje vrstevnatou vodonosnou vrstvou. Velké zvodnělé vrstvy neexistují. Zlomy, které se vyskytují pod hloubkou 70-100 m, jsou z velké části zapuštěné a mylonitizované, a proto hydraulicky těsné. Během těžby a po ní nebyla pozorována reaktivace poruchových zón. Při numerické simulaci, která je sledována na velké ploše, je třeba předpokládat vertikální funkci rotliegendu, která v zásadě zadržuje důlní vodu.

3.2 Těžba

Během období průmyslové těžby (1859-1971) bylo vytěženo 142 milionů tun uhlí. V revíru bylo nalezeno celkem 16 uhelných slojí, které byly alespoň částečně těžitelné. U provedené numerické simulace byly brány v úvahu sloje Grundflöz, Vertrauensflöz, Glück-Auf-Flöz a Oberflöz (viz Obrázek), neboť údaje o distribuci digitálních slojí byly v době, kdy byl model vytvořen, k dispozici pouze pro tyto sloje.

Podrobné informace o mocnosti slojí nebo jednotlivých těžebních polích nebyly k dispozici v digitálně použitelné formě. Eckart und Unland (2005) odhadli objem stále otevřených důlních prostor pomocí objemové bilance. Objem těchto prostor v dolech má tedy 45 milionů m³. Na základě dostupných map rozložení slojí (těžební plocha: přibližně 44,4 milionu m²) byla odvozena průměrná mocnost těžby 1 m. Tuto hodnotu je třeba považovat za velmi nízkou, jelikož není brána v úvahu nerovnoměrná těžební geometrie, větší opuštěné důlní oblasti, ale ani jiné těžené sloje. Ve výsledku byla průměrná výška výrubu pro danou geometrii zjednodušena na 2 m. To je pochopitelné, protože nejsou známy ani výška zlomové oblastí ani rozměry narušených, a tedy potenciálně zaplavených oblastí v nadloží. Prostorové rozdělení těžebních procesů není k dispozici digitálně, takže bylo nutné učinit obecný předpoklad. Jelikož v posledních desetiletích těžby byla běžnou metodou lomová těžba, je tato metoda přijata zjednodušeným způsobem pro celou oblast. Pro všechny oblasti těžby se předpokládá samovychýlení.











Obrázek 3: Hloubka a rozdělení implementovaných uhelných slojí v okrese Lugau-Oelsnitz.

3.3 Stav hladiny důlní vody a měření zvýšení hladiny

Ve zkoumané oblasti jsou dvě měřicí místa důlní vody pro monitorování hladiny důlní vody a pro odběr vzorků k chemické analýze. První měřicí bod (GWM I) byl zřízen v městské oblasti Oelsnitz s hloubkou filtrační části přibližně 610 m. Vzhledem ke složitým geologickým podmínkám a nejasným cestám proudění důlní vody v budově dolu, byl zřízen druhý měřící bod v Gersdorfu (GWM II). Série měření jsou zobrazeny na Obrázek. Data ukazují do značné míry rovnoměrný a téměř lineární vzestup důlní vody po celou dobu pozorování. Průměrná rychlost vzestupu hladiny důlní vody je 10,5 m / a (GWM I) nebo 11,4 m / a (GWM II). Na základě těchto údajů byl pro numerickou simulaci předpokládán průměrný nárůst hladiny důlní vody o 11 m / a pro celou oblast. Extrapolací předchozího nárůstu hladiny důlní vody lze očekávat, že hladina důlní vody dosáhne na vrchol terénu v oblasti nejnižších nadmořských výšek v Hegebachtalu ve 30. letech 20. století. Tento předpoklad je založen pouze na předchozích pozorováních. Jelikož se hydraulické podmínky blízko povrchu výrazně liší od hlubšího podloží, je změna chování při zaplavení v budoucnu velmi pravděpodobná, ale ze současné perspektivy ji nelze předpovědět.

Od roku 1996 byla pro přibližně 50 měřících bodů v uhelném revíru Lugau-Oelsnitz obnovena nivelace. Od té doby probíhají v nepravidelných a delších intervalech (1996/1997, 2002, 2006, 2014) nivelační kampaně. Výsledky měření jsou zobrazeny na Obrázek jako deformační zdvihové míry (zdvih / rok). Jelikož nejsou k dispozici přesná data měření pro jednotlivé měřicí body, byly stanoveny zdvihové míry pro celé roky. Proto jsou možné chyby při stanovení rychlosti elevace pro jednotlivé body až do 25 %.











Obrázek 4: Údaje o hladině důlní vody pro GWM I a GWM 2 s příslušným lineárně extrapolovaným trendem (černá přerušovaná čára). Umístění měřicích bodů viz obr. 1 (k 15. prosinci 2020). Grubenwasserstand = Stav hladiny důlní vody / m nadmořské výšky; GWM = místo měření podzemní vody.

Satelitní data InSAR byla také použita ke zlepšení pokrytí měření a časového rozlišení měření (zpracování ISBAS DINSAR). Výsledky InSAR ukazují srovnatelné výškové hodnoty ve zkoumané oblasti. Mimo těžební oblasti ukazují satelitní data osídlení, která nejsou potvrzena nivelací. Pravděpodobně se jedná o artefakty ze zpracování. Maximální rychlost zdvihu je 2 mm / a - 4 mm / a. Vývoj zdvihové míry v čase (viz Obrázek) ukazuje expanzi oblasti zdvihu směrem na východ. To lze vysvětlit nástupem zaplavení ve východních důlních oblastech, které jsou od západní části dolu odděleny zlomem šachty Pluto s výškou skoku 100–150 m. Ve stejném období byla zaplavena i plošší jižní důlní pole. Vzhledem k malé hloubce a vysoké mocnosti těžby, jsou zdvihové míry v této oblasti obzvláště vysoké.



Obrázek 5: Roční míry růstu pro různá období a-c) nivelace; d) Satelitní data InSAR (Sentinel 1). Breite = Šířka; Länge = Délka; Nivellement = Nivelace.









4 Numerické simulace

4.1 Strategie modelování a konstrukce modelu

Pro numerickou simulaci procesů zdvihu byl použit mechanický přístup kontinua a výpočty byly provedeny v FLAC3DTM. Vzhledem k omezenému množství dat byl model odpovídajícím způsobem zjednodušen. Do modelu nebyly zabudovány žádné zlomy (zkreslení), protože nemají na hydraulické a mechanické procesy praktické účinky. Vzhledem k tomu, že hydraulické procesy nejsou u stařiny dostatečně známé a předpokládá se, že propustnost v nadloží je nízká, bylo v simulaci upuštěno od hydraulického toku. S lepšími daty by implementace procesů hydraulického toku u stařiny byla v zásadě možná. Stoupající hladina vody v jámě byla alternativně zaznamenána jako změna tlaku v pórech u stařiny nebo ve výše ležících uvolněných oblastech. Tato změna tlaku snižuje efektivní stavy tlaku v příslušné oblasti a tím vytváří vztlak a v důsledku toho rozšíření "zaplavené" modelové oblasti.

Dostupný geologický model je ve srovnání s mocností a strukturou jednotlivých rotliegendských útvarů poněkud nepřesný. Ostatní geologické vrstvy v nadloží jsou velmi tenké a nemají pro modelování vztlaku velký význam. Na základě dostupných údajů významné rozlišení mechanických parametrů mezi jednotlivými formacemi není dále možné. Z těchto důvodů byl vytvořen dvouvrstvý model (nadloží a podloží), ve kterém jsou sloje a uvolněné oblasti nahoře shrnuty jako uvolňovací pásmo (viz Obrázek). Model je založen na rovnoměrně strukturované hexahedrální mřížce, která je okolo dolů dále vylepšována.



Obrázek 6: Řez geometrií modelu, jednotná mřížová struktura se slojemi s vyšším rozlišením (stařina) a zjednodušená geologie.

Geometrie těžby a lomu mají největší vliv na výsledky simulace. Pro mocnost sloje, popř. stařiny, byly použity průměrné hodnoty: Mocnost sloje je odhadována na 2 m. Mocnost narušených a uvolněných nebo zavalených oblastí je definována pomocí dvou různých přístupů. Mocnost přímo zavalené stařiny se odhaduje na 3 až 4násobek mocnosti sloje (Bekendam , 2017). V důsledku trhlin, které se vytvářejí v nadloží, však důlní voda výrazně proniká hlouběji do horniny a velmi rychle nasycuje vrstvy, které vodu skutečně zadržují (Ahmed et al. 2018). Chiang a Peng (1984) odhadují vertikální rozsah oblasti ovlivněné důlní vodou na 28 až 42násobek mocnosti těžby. Jelikož pro oblast Lugau-Oelsnitz nejsou k dispozici žádná měrná data o mocnosti uvolňovacího pásma, byla na základě naměřených dat stanovena tato hodnota na 100 m prostřednictvím modelové kalibrace (viz část a).









Pro celý model je použit pružný zákon hmoty. Coby krajní podmínky byly bez dalších vnějších sil použity na bočních a dolních hranicích modelu válcové okrajové podmínky. Horní hrana modelu odpovídá funkci horní hrany terénu bez jakýchkoli krajních podmínek. Numerické výpočty se provádějí ve dvou krocích: První krok spočívá ve výpočtu rovnováhy v suchém stavu, což odpovídá situaci po ukončení těžby a před zaplavením místa. Druhý krok numerické simulace zahrnuje postupné zaplavení dolu. Za tímto účelem byla numericky simulována situace zdvihu v době, kdy jsou k dispozici měření zdvihu. Hladina dolu (a tím i průběh zdvihu) byla navíc simulována ve čtyřletých intervalech před rokem 1996 a po roce 2018.

4.2 Parametry modelu a kalibrace

Kromě geometrie modelu je obzvláště důležitá volba zákona hmoty. V ideálním případě jsou založeny na naměřených hodnotách ze zkoumané oblasti nebo z mechanických zkoušek hornin na vzorcích z objektu zkoumání. Konečné parametry modelu jsou uvedeny v Tabulka 1. Vzhledem k tomu, že místo dolu v okrese Lugau- Oelsnitzer není přístupné, musely být použity srovnatelné hodnoty z jiných okresů, jakož i odhady a kalibraci modelu. Proto byly pro kalibraci vytvořeny zkušební série. V testovací sérii E1 - E3 byly provedeny tři simulace s různými moduly pružnosti nadloží (viz Tabulka 2), přičemž mocnost zóny rozvolnění je 50 m. V testovací sérii V1 - V4 se mocnost zóny rozvolnění pohybovala od 20 - 150 m (viz Tabulka 3). Tyto testovací případy mají ukázat vliv vstupních proměnných a používají se ke kalibraci simulace na měření nadmořské výšky. To umožnilo získat konečné parametry modulu pružnosti (viz Tabulka 1) a výšky zlomu (100 m).

Parametr	Přetížení	Stařina (suchá)	Stařina (zaplavená)	Podzemí
E-Modul / GPa	4.0 - 12.0	0.18 - 12.0	0.18 - 12.0	55.0
Poissonův poměr	0.30	0.30	0.30	0,17
Hustota / kg / m³	2660	2660	2968 - 3070	2750
Poréznost			0.30 - 0.40	
Velikost zóny / m (horizontální vertikální)	80/40	20/10	20/10	80/40

Tabulka 1: Přehled nejdůležitějších parametrů modelu pro předpověď zdvihu.

Tabulka 2: Hodnoty modulu pružnosti v nadloží ve zkušebních případech E1 - E3 pro zónu rozvolnění o mocnosti 50 m.

	E1	E2	E3
E-Modul nadloží/ GPa	6,7- 20,0	5.0 - 15.0	4.0 - 12.0
E-Modul stařiny (suché) / GPa	0 225 - 20.0	0 225 - 15.0	0:18- 12.0
E-Modul stařiny (zaplavené) / GPa	0.225 - 20.0	0 225 - 15.0	0:18- 12.0
Mocnost uvolňovací zóny / m	50,0	50,0	50,0

Tabulka 3: Hodnoty pro mocnost uvolňovací zóny rozvolnění ve zkušebních případech V1 - V4 s modulem pružnosti pro nadloží.

	V1	V2	V3	V4
Mocnost uvolňovací zóny / m	20,0	50,0	100,0	150,0
E-Modul nadloží/ GPa	5,0- 15,0	5,0- 15,0	5,0- 15,0	5,0- 15,0
E-Modul stařiny (suché) / GPa	0225- 15,0	0 225 - 15.0	0 225 - 15.0	0 225 - 15.0
E-Modul stařiny (zaplavené) / GPa	0225- 15,0	0225- 15,0	0225- 15,0	0225- 15,0









V blízkosti povrchu terénu je použit lineární gradient modulu pružnosti, aby bylo možné modelovat jeho redukci směrem k povrchu (např. Od 12 GPa do 4 GPa pro model E3). To je obvykle způsobeno zvětráváním vrstev hornin blízko povrchu. Modul pružnosti je také upraven v oblastech zlomu (Obrázek 6). Za tímto účelem se používá ode dna sloje až k hornímu okraji zóny rozvolnění lineárně rostoucí gradient modulu pružnosti. Modul pružnosti nadloží a jeho odpovídající gradienty byly pro konečnou prognózu odhadnuty pomocí testů citlivosti a kalibrace modelu.

Poissonův poměr se považuje za konstantní pro jakoukoli geologickou strukturu. Hodnoty byly odvozeny z obecných hodnot vycházejících z literatury a také z vyhodnocení výzkumů jádrového vrtání na dvou hlubinných vrtech důlní vody. Hustota pro příslušné geologické / těžební jednotky byla zvolena podle hodnot z literatury. U zaplaveného stavu byla hustota zvýšena v souladu s podílem zaplaveného prostoru pórů. Vycházelo se z průměrné pórovitosti 40 % v lomu a 30 % v narušeném pískovci v nadloží. Zde je třeba poznamenat, že hustotu a pórovitost oblasti lomu, stejně jako částečně zavedené odsazení, lze odhadnout jen velmi nepřesně a velmi se liší v prostoru. Lepší charakterizace není možná kvůli nepřístupnosti těžebního díla.

Zvýšení hladiny důlní vody nebylo provedeno jako hydromechanicky vázaná simulace, ale bylo zahrnuto do mechanické simulace jako další termín hydrostatického namáhání. Termín aditivního napětí se vypočítá pro každou zónu i v zatopené budově dolu pomocí následující rovnice:

$$\Delta \boldsymbol{p}_i = \boldsymbol{\rho}_{\mathsf{w}}^* \boldsymbol{g}^* \boldsymbol{h}_{\mathsf{w},i}$$

kde P_W hustota vody, g je gravitační zrychlení a výška vodního sloupce nad zónou i. Na tomto základě se pro každou samostatnou hladinu důlní vody vypočítá zdvih povrchu země (Obrázek).

Vybrané kroky zatopení pro numerickou simulaci byly stanoveny podle dostupných údajů o zdvihu. Míry zdvihu byly navíc simulovány ve čtyřletých intervalech před rokem 1996 a po roce 2018. Předpokládal se stálý lineární nárůst důlní vody. V současné době však není spolehlivě možná podrobná prognóza průběhu zaplavení v závěrečné fázi (horní 70–100 m). Obrázek zobrazuje průběh zaplavení měřený a předpokládaný v numerické simulaci, Tabulka 4 poskytuje přehled vybraných simulačních kroků. Aby bylo možné provést srovnání s numerickým řešením, byl vedle numerického řešení aplikován analytický přístup popsaný v části 2 také v revíru Lugau-Oelsnitz.



Obrázek 7: Data měření hladin důlní vody pomocí extrapolovaných hladin důlní vody pro numerickou simulaci.







LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE



Tabulka 4: Kroky numerických vý	počtů simulace.
---------------------------------	-----------------

Rok	Důlní voda - stav / m	Údaje o zdvihu
1996	-155	
2002	-86	Nivelace
2006	-41	Nivelace
2014	50	Nivelace
2014	50	InSAR
2018	96	
2022	141	
2026	187	
2030	232	
2034	278	
2038	324	

Výsledky a diskuse 5

Výsledky řady kalibračních zkoušek 5.1

regionální rozvoi.

Výsledky celkových zdvihů způsobených simulovaných zaplavením testovací řady E1 - E3 s 50 m mocnou zónou rozvolnění jsou zobrazeny jako obrysové grafy. Při maximální tuhosti nadloží 20 GPa dochází pouze k maximálním zdvihům kolem 36 mm (E1). Pokud se sníží tuhost nadloží, zvýší se maximální zdvih na přibližně 51 mm (E2) a 67 mm (E3). Výsledky testovací série výšky zlomu lze vidět na Obrázek 9. Zde se maximální zdvih zvyšuje z přibližně 15 mm u modelu V1, přes 51 mm (V2) a 112 mm (V3) až na 170 mm u modelu V4. Tím se objasňuje, že méně tuhé nadloží (a stařina) a silnější zóna rozvolnění vedou k větším deformacím/zdvihům horní části terénu.



Interreg V A / 2014-2020



a)



Obrázek 8: Celkové deformace/zdvihy testovací řady E1 - E3. Nordwert =Severní hodnota; Ostwert = Východní hodnota; Gesamthebung (Modellierung E1) = Celková deformace/zdvih (modelace -E1).

Obrázek 9: Celkové deformace/zdvihy testovací řady V1– V4. Nordwert =Severní hodnota; Ostwert = Východní hodnota; Gesamthebung (Modellierung V1) = Celková deformace/zdvih (modelace -V1).

5.2 Výsledky předpovědi deformace/zdvihu

Obrázek ukazuje výškové rychlosti (obrysové znázornění) vyplývající z konečné numerické simulace (parametry z Tabulka) ve srovnání s naměřenými výškovými hodnotami (body). Výsledky ukazují velmi dobrou shodu s ohledem na vývoj výškových oblastí v čase a individuální výšková maxima. Zejména lze pomocí numerické simulace dobře reprodukovat expanzi vyšších rychlostí zdvihu směrem na jih a jihovýchod. Tento posun v maximech zdvihu lze vysvětlit plošší polohou jižní a východní těžební oblasti a lze jej snadno ověřit v modelu. Poté, co byla většina dolů v jižní oblasti zatopena, se expanze pozvednuté oblasti opět zpomalila (viz Obrázek d). Maximální rychlosti zdvihu v numerické simulaci a měření jsou mezi 2 a 4 mm / a.













Obrázek 10: Míry zdvihu numerické simulace (kontura) a monitorovacích dat (body) pro zkoumané období 1996-2018.

30

Na základě již popsaných kroků postupného zaplavení byla vypočítána rychlost deformace/zdvihu ve 4letých intervalech až do přibližné konečné výšky hladiny důlní vody (324 m n. M.) (Viz Obrázek). Dosažení konečné úrovně zaplavení je velmi spekulativní. Kowarik a spol. (2018) vycházejí z bezpečnostních důvodů z maximální výšky hladiny důlní vody 300 m nad mořem. Diskuse o možných dopadech nárůstu důlní vody na blízké povrchové oblasti (70 až 100 m pod úrovní terénu) a možná rizika a bezpečnostní opatření, o která je třeba usilovat, uvádí (Kowarik et al. 2018). Za předpokladu převážně lineárního záplavového procesu lze v budoucnu očekávat jen velmi mírné zvýšení míry zdvihu (viz Obrázek). Kromě toho se oblast zdvihu bude i nadále pomalu rozšiřovat směrem na východ. Přesný průběh zdvihu v oblasti východního okraje revíru je však vzhledem k velmi neúplným údajům o těžbě z těchto oblastí a již již zmíněným obtížně předvídatelným procesům v nejvyšších 70–100 m velmi spekulativní.











Obrázek 11: Modelované roční míry zdvihu pro různé intervaly zaplavení (viz Tabulka 4).

Celkové výsledky numerické simulace jsou uvedeny v Obrázek 12 a. Podle toho dochází k maximálnímu zdvihu v severozápadní důlní oblasti, která obsahuje velkou část nejhlubších těžeb. Tamější vyšší hodnoty zdvihu jsou způsobeny velkou hloubkou a souvisejícím vyšším tlakem vody v pórech ve srovnání s mělčími oblastmi jižní těžby. Je dosaženo maximálního zdvihu kolem 15 cm. Tyto hodnoty souhlasí s měřeními zdvihu v jiných oblastech (Bekendam, 2017) (Heitfeld, Denys, de Vent, Klünker, & Rosner, 2015)

Analytické řešení (Obrázek 12 b) poskytuje podobné rozdělení zdvihů se třemi vyvinutými maximy zdvihu. Analytické řešení však nadhodnocuje hodnoty zdvihu. Ve srovnání s rychlostmi zdvihu numerickém modelu a s měřeními se u řešení Sroka-Preuße vyskytují vyšší hodnoty mezi 2 a 5 mm / a, což vysvětluje vyšší celkovou elevaci.

Numerický model tak poskytuje dobré přiblížení hodnot zdvihu, které lze ověřit monitorovacími údaji, a dodává věrohodné celkové průzkumy. Výsledky poskytují informace o rozsáhlém rozložení zdvihů. Výpovědi o lokálních událostech, např. v povrchových šachtách nebo při přerušení provozu, nejsou možné. Prognóza zdvihu proto podléhá zvýšené nejistotě kvůli předpokladům učiněným pro modul pružnosti, výšku zlomové zóny atd. To je způsobeno extrémně omezenou databází.











Obrázek 12: Celkové deformace/zdvihy numerického řešení (a) a analytického řešení (b). Nordwert =Severní hodnota; Ostwert = Východní hodnota; Gesamthebung (Modellierung) = Celková deformace/zdvih (modelace); Gesamthebung (analytsche Berechnung) = Celková deformace/zdvih (analytický výpočet).

6 Závěry

Numerická simulace zdvihu způsobeného nárůstem důlní vody ukázala následující:

- I při velmi omezených datech lze procesy zdvihu způsobené důlní vodou dobře modelovat na nepoužívaném uhelném dole. K tomuto účelu byl použit poměrně jednoduchý simulační přístup, který přináší věrohodné výsledky i bez rozsáhlých znalostí hydraulických vlastností a podmínek v těžebním procesu.
- Zvolený přístup je vhodný pro složité geologické a těžební geometrie, zejména se strmými slojemi. Získané výsledky jsou ve srovnání s předloženými analytickými metodami založenými na superpozici věrohodnější.

Vzhledem k provedeným předpokladům (nadloží E-modulu, výška zlomu atd.) jsou výsledky velice nejisté. Zde prováděná šetření navíc poskytují pouze informace o efektu zdvihu hlubších těžebních oblastí v nezvětralých horách. Účinky nárůstu důlní vody na nejvyšších 70-100 m pod úrovní terénu nelze v tomto velkoplošném modelu zohlednit. Pokud se rychlost vzestupu důlní vody změní, musí být také tento model přehodnocen. Pro podrobnější numerickou simulaci je třeba vzít v úvahu následující aspekty:

- Pro přesnější simulaci zdvihu se doporučuje komplexní dlouhodobý monitoring hladiny důlní vody v důlním díle, ale také monitoring časových změn hladiny podzemní vody v nadloží. To je obzvláště nutné pro lepší posouzení efektu zdvihu v nadloží.
- K tomu, aby bylo možné deformaci/zdvih plně zmapovat a porozumět mu, je nezbytný konzistentní geometrický model podloží s ohledem na geologické struktury, ale také na stavbu důlního díla (včetně mocnosti těžby a situace zakládky).

Poděkování

Studie byly provedeny Evropským fondem pro regionální rozvoj (ERDF) a Svobodným státem Sasko v rámci "Interreg V A - SN-CZ 2014–2020" (název projektu: "GeoMAP"; Číslo projektu 100348899). Děkujeme všem přispívajícím projektovým partnerům. Zvláštní poděkování patří Davidu Geeovi (University of Nottingham) za zpracování a zpřístupnění dat InSAR.









Literatura

- Ahmed, Samar S.; AlHeib, Marwan; Gunzburger, Yann; Renaud, Vincent (2018): 3D Numerical Simulation of the Goaf Due to
 - Large-Scale Longwall Mining. In: Hany Shehata und Youssef Rashed (Hg.): Numerical Analysis of Nonlinear Coupled

Problems. Cham: Springer International Publishing (Sustainable Civil Infrastructures), S. 121–131.

- Beak Consultants GmbH (2020): Auswertung von Bodenbewegungsdaten aus der Georadarfernerkundung zur Untersuchung von bergbau- und flutungsbedingten Senkungen und Hebungen der Erdoberfläche im Steinkohlenrevier zur Festlegung von Bohrlochansatzpunkten. Teilprojekt 2.3.1.5, Teil 2. Vita-Min-Projekt Abschlussbericht. Beak Consultants GmbH. Freiberg.
- Bekendam, Roland (2017): Abschätzung der Bodenhebungen in Folge des Grubenwasseranstiegs über stillgelegten Kohlegruben im Südlimburger Revier. In: Günter Meier (Hg.): 17. Altbergbau-Kolloquium. 16. bis 18. November 2017, Freiberg. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 118–130.
- Bekendam, R. F.; Pöttgens, J. J. (1995): Ground movements over the coal mines of southern Limburg, The Netherlands, and their relation to rising mine waters. In: Land Subsidence. FISOLS - Fifth International Symposium on Land Subsidence. The Hague, 10/1995. IAHS & Netherlands Geodetic Commission (IAHS Publi., no. 234).
- Berger, H.-J.; Steinborn, H.; Görne, S.; Junghanns, C. (2010): Stratigraphie und Tektonik im Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz.
 In: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hg.): Geoprofil 13 (2010): Geologie und Bergbaufolgen im Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Freiberg, S. 15–43.
- Beyer, J. (1974): Bergschadenskundliche Analyse "Lugau-Oelsnitz". VEB Baugrund Berlin, Produktionsbereich Zwickau & VEB Steinkohlenwerk Oelsnitz. Zwickau.
- Dudek, Mateusz; Tajduś, Krzysztof; Misa, Rafał; Sroka, Anton (2020): Predicting of land surface uplift caused by the flooding of underground coal mines A case study. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 132, S. 104377. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104377.
- Eckart, M.; Rüterkamp, P. (2013): Konzeptentwicklung zur gesteuerten Flutung des ehemaligen Steinkohlenreviers Lugau-Oelsnitz und Darstellung technischer Lösungen für die Konzeptumsetzung. EU-Projekt VODAMIN. Bericht. DMT GmbH & Co. KG.
- Eckart, M.; Unland, W. (2005): Aufbau eines Grubenwasserwiederanstiegsmodells für das Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz, Teil II. unveröff. Bericht. DMT GmbH & Co. KG. Essen.
- Felix, M.; Berger, H.-J.; Köhler, U.; Döhner, S.; Kauk, S.; Löbel, K.-H. (2007): Bergbaufolgen im ehemaligen Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz unter besonderer Berücksichtigung des Grubenwasseranstiegs. Abschlussbericht. Landesamt für Umwelt und Geologie - Oberbergamt.
- Gee, David; Bateson, Luke; Sowter, Andrew; Grebby, Stephen; Novellino, Alessandro; Cigna, Francesca et al. (2017): Ground Motion in Areas of Abandoned Mining: Application of the Intermittent SBAS (ISBAS) to the Northumberland and Durham Coalfield, UK. In: *Geosciences* 7 (3), S. 85. DOI: 10.3390/geosciences7030085.
- Gee, David; Sowter, Andrew; Novellino, Alessandro; Marsh, Stuart; Gluyas, Jon (2016): Monitoring land motion due to natural gas extraction: Validation of the Intermittent SBAS (ISBAS) DInSAR algorithm over gas fields of North Holland, the Netherlands. In: *Marine and Petroleum Geology* 77, S. 1338–1354. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2016.08.014.
- Heitfeld, Michael; Denys, Frank; Klünker, Johannes; Rosner, Peter; Spaans, Jaap (2016a): Systematische Erfassung und Bewertung von Spätfolgen des Steinkohlenbergbaus in Südlimburg/Niederlande. In: *Berg Huettenmaenn Monatsh* 161 (4), S. 156–163. DOI: 10.1007/s00501-016-0465-7.
- Heitfeld, N.; Rosner, P.; Mühlenkamp, M. (2016b): Gutachten zu den Bodenbewegungen im Rahmen des stufenweisen Grubenwasseranstiegs in den Wasserprovinzen Reden und Duhamel. Bewertung des Einwirkungspotentials und Monitoringkonzept. - Anstieg bis -320 mNHN -. Ingenieurbüro Heitfeld - Schetelig GmbH. Aachen.
- Heitfeld, Michael; Denys, Frank; vent, Ilse de; Klünker, Johannes; Rosner, Peter (2015): Bewertung der Risiken durch Spätfolgen des Steinkohlenbergbaus in Südlimburg/Niederlande. In: Günter Meier (Hg.): 15. Altbergbau-Kolloquium. Vom 5. bis 7. November 2015 in Leoben, [Montanuniversität Leoben. Nossen: Wagner, S. 130–146.
- Heitfeld, Michael; Rosner, Peter; Mühlenkamp, M. (2014): Auswirkungen von Geländehebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier - ein Ansatz zur Bewertung der Risiken. In: Günter Meier (Hg.): 14. Altbergbau-Kolloquium. Vom 6. bis 8. November 2014 in Gelsenkirchen. Nossen: Wagner.
- John, André (2019): Untersuchungen zum Monitoring von Bodenbewegungen in Folge des Grubenwasseranstiegs im ehemaligen Steinkohlerevier Oelsnitz/Erzgebirge mittels Radarinterferometrie. In: G. Mayer, C. Butscher, J. Benndorf, K.-H. Löbel, D. Tondera und Wolfgang Busch (Hg.): 19. Altbergbau-Kolloquium. Leoben, 07. bis 09. November 2019. Nossen, Deutschland: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 127–142.

Knothe, S. (1984): Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej. Katowice: Wydawnictwo Śląsk.









- Kowarik, J.; Eckart, M.; Rüterkamp, P.; Dabrowski, A.; Schubert, J.; Beige, H. (2018): Erarbeitung inhaltlicher Aspekte für ein Rahmenkonzept zu "Bergbaunachfolgen des ehemaligen Steinkohlereviers Lugau-Oelsnitz / Erzgeb.". DMT-Leipzig.
- Löbel, K.-H.; Tamaskovics, N.; Eckart, M.; Busch, W. (2015): Vertikale Bodenbewegungen im Zusammenhang mit dem Grubenwasseranstieg im ehemaligen Steinkohlenrevier Oelsnitz/Erzgebirge. In: Günter Meier (Hg.): 15. Altbergbau-Kolloquium. Vom 5. bis 7. November 2015 in Leoben, [Montanuniversität Leoben. Nossen: Wagner, S. 114–129.

Peng, Syd S.; Chiang, Han Shing (1984): Longwall Mining. New York: Wiley.

- Pöttgens, J. J. E. (1985): Bodenhebung durch ansteigendes Grubenwasser. In:. 6. Internationaler Kongress für Markscheidewesen. Harrogate, S. 928–938.
- Sächsisches Oberbergamt (Hg.) (2014): Erfahrungen im Umgang mit aufsteigenden Grubenwässern. Studie im Rahmen des Ziel 3-Projektes VODAMIN. Unter Mitarbeit von Stephan Uhlig. Sächsisches Oberbergamt.
- Sroka, A.; Preusse, A. (2017): Technische Abschätzung von Folgelasten des Steinkohlebergbaus. In:. 9. Aachener Altlastenund Bergschadenskondliche Kolloquium: "Ende des subventionierten Steinkohlenbergbaus - aktueller Stand und langfristige Entwicklungen". Aachen, 11.-12.06.2017. GDMB (Schriftenreihe der GDMB, 112), S. 49–58.











Využívat geotermální energii dolu jako inovativní zdroj energie v post-těžebních oblastech

L. Oppelt, S. Pose, T. Grab, T. Fieback TU Báňská akademie Freiberg, Katedra technické termodynamiky

Klíčová slova: Důlní voda, obnovitelná energie, geotermální energie, topení, chlazení, tepelná čerpadla

Souhrn

Staré doly nabízejí příležitost pro zásobování obnovitelnou energií. Díky teplotám, které jsou celoročně více méně stálé a vzhledem k obrovským masám hornin, které slouží jako povrchy pro přenos tepla, je důlní voda ideální pro vytápění a chlazení.

V příspěvku je uveden přehled základní technologie a aktuálního stavu stávajících, plánovaných a vyřazených zařízení. V Sasku a v Česku bylo zkoumáno 12 aktivních systémů. Stejně jako v Sasku, i v České republice existuje další potenciál pro využití důlní vody k výrobě energie, např. v Mariánských Radčicích, kde by bylo možné ročně na čerpací stanici využít zhruba 11 GWh tepelného tepla.

V důsledku mineralizace důlní vody vznikají ve výměníku tepla mezi důlní vodou a meziobvodem usazeniny, což se stalo výzvou v energetickém využívání důlní vody. Účinnost systému je výrazně snížena. V projektu GeoMAP bylo proto vyvinuto zkušební zařízení tepelného čerpadla, pomocí kterého lze v různých těžebních oblastech zkoumat možná protiopatření. Při zkouškách in situ byly testovány různé materiály a povrchy; nejlepších výsledků dosáhl stříbrný nano povlak, který zajišťuje menší tvorbu usazenin na desce výměníku tepla.

1 Úvod

Od září roku 2016 pracují německé a české společnosti a výzkumné instituce v projektech VODAMIN II financovaných Evropskou unií v rámci programu spolupráce Svobodného státu Sasko a České republiky (číslo žádosti SAB: 100304269) a GeoMAP (SAB-číslo žádosti: 100348899) společně na tématech souvisejících s přeshraniční ochranou vod a potenciálem nebezpečí a využití důlních vod. Důlní vody obvykle mají po celý rok téměř konstantní úroveň teploty, a proto jsou ideální pro vytápění a chlazení. V závislosti na lokalitě existují různé možnosti pro odběr důlní vody, např. v Porúří může být důlní voda, která je čerpána k ochraně podzemní vody, použita přímo geotermálně. Na jiných místech, např. ve Freibergu, je možné použít důlní vodu z drenážních tunelů. Přehled možných těžebních bodů i možných výpustných míst a potenciálních uživatelů je zobrazen na obr.1. Na tomto obrázku je navíc zobrazen základní princip geotermálního systému důlní vody. Teplá důlní voda se nejprve čerpá do výměníku tepla, který je často umístěn pod zemí, aby se snížilo čerpací úsilí. Důlní voda se poté ochladí v tomto tepelném výměníku a takto extrahované teplo se přenese na tekutinu v meziobvodu. Takto chlazená důlní voda se poté vrací například do drenážního tunelu. Tekutina v meziobvodu, která absorbovala teplo, cirkuluje jako uzavřený systém, což udržuje nízké elektrické výdaje. Pokud je teplota důlní vody dostatečně vysoká, je teplo vedeno do topného okruhu mezilehlým okruhem a může být použito přímo k vytápění. Ve většině případů však musí být teplota zvýšena pomocí tepelného čerpadla. Použití důlní vody k chlazení je založeno na stejném principu, až na to, že teplo je odváděno z budovy, která má být ochlazována, a poté přenášeno do důlní vody přes výměník tepla, který se následně ohřívá v režimu chlazení. Princip popsaný u meziobvodu je celosvětově nejčastěji implementovanou strukturou (Grab a spol. 2018). Další možné systémy, např. uzavřený cyklus, jsou podrobněji popsány v (Grab a spol. 2018).











Obrázek 1: Schematické znázornění základního principu energetického využití důlní vody, jakož i možných míst odběru a vypouštění a potenciálních uživatelů (Oppelt et al. 2020a). Překlad z textu: (1) Potenciální uživatelé; Průmysl, obytné budovy, muzea, budovy dolů, nemocnice, kryté bazény, skleníky, zemědělství, chov ryb; (2) Výměník tepla; (3) mezi-obvod; (4)Čerpadlo důlní vody; (5) Místa k odčerpávání za účelem ochrany podzemních vod a povrchů, nevyhnutelně odčerpávaná voda, tunely pro uvolňování vody, stoupající hluboké vody, vodou naplněné doly, hluboce zaplavená důlní díla; (6) Vypouštěcí body pro povrchovou vodu, tunely pro vypouštění vody, výkopy naplněné vodou, hluboce zaplavené jámy, které neodvádějí vodu přímo na povrch. Status quo geotermální energie z důlních vod

2 Status quo geotermální energie z důlních vod

Vyřazené doly se používají k výrobě energie od 80. let, jeden z prvních systémů byl postaven v Kingstonu v Pensylvánii v roce 1981 a slouží k vytápění zábavního centra (Korb 2012). Přehled zařízení aktuálně aktivních, z provozu vyřazených a zařízení ve výstavbě a studie pro Evropu a Severní Ameriku je uveden na obr. 2. Mimo tyto oblasti bylo možné celosvětově prozkoumat pouze jedno zařízení v Číně (Guo et al. 2017). Je tedy zřejmé, že energetické využívání důlní vody bylo dosud v zásadě omezeno na Německo, Velkou Británii, USA a Kanadu. Podrobnosti o jednotlivých systémech po celém světě zveřejnili Grab a spol. (Grab et al. 2018) a Oppelt a spol. (Oppelt et al. 2021a).












Obrázek 2: Přehled geotermálních systémů důlních vod v Evropě (nahoře) a Severní Americe (níže) (Závody v provozu ●, odstavené závody po provozu ◆, závody ve výstavbě / plánování / studie △) (po Grab et al. 2018).

V Německu se implementované systémy a studie soustřeďují na dva hlavní těžební regiony: Krušné hory a Porúří. Deset z 18 aktivních zařízení v Německu se nachází v Krušných horách. Strukturální změna je tam již pokročilejší, některá zařízení, jako je to v Ehrenfriedersdorfu, fungují již od 90. let (Oppelt et al. 2020b). Kromě toho je v současné době ve výstavbě jediné německé zařízení v Sasku: v bývalé uranové těžební oblasti Königstein v Saském Švýcarsku se v současné době buduje systém vytápění firemní budovy (Jenk 2020). V rámci projektu GeoMAP je věnována zvláštní pozornost následné péči a opětovnému použití dolů v Sasku a v Česku, ta poskytuje přehled o současném stavu zařízení Tabulka 5:



Europäische Union. Europäischer Fonds für regionale Entwicklung. Evropská unie. Evropský fond pro regionální rozvoj.



5





Tabulka 1: Umístění a parametry geotermálních systémů důlních vod implementovaných v Sasku a v Česku (SN = Sasko, CZ = Česko).

Místo	Jméno	Zákazník	Zdroj Topný výkon		Zdroj:	
		×		V KW		
Bad Schlema	Dul Schlema-	Skola	Uran	200	(Debes 2012; Ramos et	
(SN)	Albenroda				al. 2015; Vater 2012;	
					Wismut GmbH 2012)	
Bad Schlema	Projekt "Leon"	Obytné	Uran	-	(Debes 2012;	
(SN)		budovy			Landesamt für Umwelt,	
					Landwirtschaft und	
					Geologie 2012; Vater	
		~			2007; Vater 2012)	
Ehrenfriedersdo	Severozápadní	Škola	Cín	95	(Debes 2012;	
rf	pole				Lagerpusch K.	
					04.02.10; Wieber and	
					Ofner 2008)	
Ehrenfriedersdo	Revír Sauberg	Museum,	Cín	120	(Kissing 2009;	
rf (SN)		kancelářská			Lagerpusch K.	
		budova			04.02.10; Raube 2012;	
					Wieber and Ofner	
					2008)	
Freiberg (SN)	Štola Alter	Zámek	Stříbro	130	(Batchelor et al. 2015;	
	Fürsten	Freudenstein			Hall et al. 2011;	
					Lagerpusch K.	
					04.02.10)	
Freiberg (SN)	Stezka Reiche	Univerzita	Stříbro	200	(Bauconzept Dresden	
	Zeche				GmbH; Grab et al.	
					2010; Staatsbetrieb	
					Sächsisches	
					Immobilien- und	
					Baumanagement 2013)	
Freiberg (SN)	Štola	Nemocnice	Stříbro	860	(Johnson Controls;	
	Rothschönberger				Ulbricht 2013)	
	Stolln					
Marienbad (CZ)	Hachov-Planá	Budova dolu	Uran	550	(Röder 2012, 2015;	
					Sunbeam GmbH 2013)	
Marienberg	Šachta Wismut-	Koupaliště	Uran	800-1700	(Lagerpusch K.	
(SN)	Schacht 302				04.02.10; Wieber and	
					Ofner 2008)	
Pobershau (SN)	Štola Walfisch-	Obytné	Cín	-	(Lagerpusch K.	
	Stollen, vila	budovy			04.02.10;	
	Weiße Villa				Mineralienatlas -	
					Fossilienatlas 2015)	
Příbram (CZ)	Prokopova šachta	Škola,	Uran	500	(Myslil and Frydrych	
		kancelářská			2005; Wolf et al. 2007)	
		budova				
Zwickau (SN)	-	Univerzita	Černé uhlí	600	(Wolf et al. 2007)	







Jak ukazuje tabulka, energetické opětovné využití dolů v Sasku a v Česku je kvůli existujícím ložiskům zaměřeno na bývalé uranové doly. Na druhé straně mají největší podíl na světě geotermální systémy pitné vody v bývalých uhelných dolech (Grab et al. 2018). Uzavření českých uhelných revírů v příštích několika letech otevře v budoucnu rozsáhlé možnosti energetického využití důlních vod.

Výsledky projektu VODAMIN II také ukazují, že na mnoha místech v Sasku a v severočeské pánvi existuje další značný potenciál pro energetické využití důlní vody. Jedním z možných umístění je čerpací stanice MR1 v Mariánských Radčicích v Mostecké pánvi. Objemový průtok kolem 100 m³ zde musí být čerpán každou hodinu. Důlní voda má stálou teplotu vyšší než 25 ° C a doposud byla vypouštěna do povrchových vod bez dalšího použití. Za předpokladu, že se důlní voda zchladí z 27,9 ° C (průměrná teplota jako součást měření ve VODAMIN II) na 17 ° C, by byl teoretický tepelný potenciál 11,1 GWh. Dle předpokládané potřeby by to stačilo k celoročnímu zásobování tepla téměř celé obce Mariánské Radčice (Oppelt et al. 2020c). Teoreticky dostupné maximální zatížení je 1,3 MW (Oppelt et al. 2020c).

Jelikož je čerpací stanice umístěna mimo zastavěnou oblast, muselo by se teplo dopravovat, což by vedlo k menším ztrátám. Z tohoto důvodu byla zvažována možnost využití tepla přímo v blízkosti čerpací stanice, např. využití pro skleníky. Nově postavený skleník vyžaduje podle současných standardů maximální zatížení topné energie kolem 150 W / m² (BDEW Bundesverband der Energieund Wasserwirtschaft e.V. 2018; Seidl 2020), což znamená, že díky dostupnému maximálnímu zatížení lze skleníky o celkové ploše 0,87 hektaru plně vytápět obnovitelnými zdroji. Při teoretickém množství energie 11,1 GWh by bylo možné zásobovat energií rajčatové skleníky o rozloze 31 ha. U studených skleníků, používaných například pro hlávkový salát nebo špenát, které vyžadují méně tepla, by přicházela teoreticky v úvahu plocha rozloze 258 hektarů. 0 Maximální zatížení by pak muselo být zajištěno pomocí jiných zdrojů energie, např. zemního plynu nebo solární tepelné energie.

3 Neefektivní provoz zařízení kvůli znečištění

Ústředním problémem v geotermálních systémech důlní vody je tvorba usazenin a kontaminace zátěží a bakteriemi (znečištění), které jsou důlní vodou přenášeny. Instalace meziobvodu sice zabraňuje znečištění tepelného čerpadla, avšak místo toho dochází k tvorbě znečištění ve výměníku tepla, což zvyšuje tlakovou ztrátu a snižuje množství přenášeného tepla. Tepelné výměníky jsou proto zpravidla konstruovány jako deskové tepelné výměníky a lze je tedy otevírat a čistit, to však je vždy spojeno s odpovídajícím úsilím a náklady na údržbu. Aby toho nebylo málo, tepelné výměníky se často instalují pod zemí, což dále zvyšuje úsilí a náklady. Na obr. 3 je znázorněn pokles tlaku ve výměníku tepla po dobu 4 měsíců. Během tohoto období musel být dvakrát chemicky a mechanicky vyčištěn. V případě jediného systému střední velikosti, např. Okresní nemocnice ve Freibergu, může znečištění vést ke ztrátám až 250 000 EUR ročně (Oppelt a spol. 2021b).











Obrázek 3: Tlaková ztráta ve výměníku tepla v geotermálním systému důlní vody Reiche Zeche (období pozorování 2. listopadu 2015 až 1. března 2016). Druckdifferenz Wärmeübertrager in bar = Tlakový rozdíl tepelného výměníku v barech; Reinigung (chemisch + mechanisch) = Čištění (chemické + mechanické); Wärmeübertrager-fouling = Znečištění výměníku tepla.

Desky výměníku tepla lze po demontáži vyčistit, což vede k dočasnému zlepšení, původní stav se však neobnoví. To ukazuje srovnání nepoužité, znečištěné a vyčištěné desky výměníku tepla na obr. 4.



Obrázek 4: Porovnání nepoužité, znečištěné a vyčištěné desky výměníku tepla.

Účinnost systému je významně ovlivněna problémem znečištění. Plánované množství energie nelze z důlní vody odebírat po celý rok a také čištění a údržba mají za následek prostoje. Zde je třeba vyvinout a otestovat opatření ke snížení znečištění nebo alespoň k umožnění snadnějšího a důslednějšího čištění. Výsledky projektu VODAMIN II ukázaly, že v závislosti na umístění se usazeniny na panelech velmi liší. To znamená, že možná opatření musí být testována na konkrétním místě. Aby byla zajištěna nezávislost na provozovatelích soustav a na lokalitách se skutečnými systémy, bylo vyvinuto mobilní zkušební zařízení tepelného čerpadla (viz obrázek 5).











Obrázek 5: zařízení zkušebního tepelného čerpadla k provádění výzkumu omezování znečištění ve výměnících tepla při energetickém využívání důlní vody (vlevo: fotografie, vpravo: 3D-Model).

Tato zkušební stanice představuje geotermální systém důlní vody v laboratorním měřítku. Desky výměníku tepla lze flexibilně vyměňovat a zkoumat, zda neobsahují usazeniny. Kromě toho byla zkušební stanice navržena tak, aby bylo možné prověřit jak vytápění, tak chlazení. Za tímto účelem je objemový průtok důlní vody rozdělen a poté ochlazen v jednom tepelném výměníku (režim vytápění) a ohříván ve druhém tepelném výměníku (režim chlazení). Následně se objemové proudy opět sjednotí, což znamená, že teplota důlní vody je ve srovnání se vstupem do zkušební stanice jen mírně ohřátá (kvůli elektrickým výdajům tepelného čerpadla). Z ekologických důvodů musí být tato okrajová podmínka zajištěna na jednotlivých místech.

První série testů byla provedena v létě 2020 na čerpací stanici MR1 v Mariánských Radčicích. Jak bylo popsáno výše, v tomto místě byl identifikován vysoký energetický potenciál, a proto je (předběžné) šetření pro efektivní provoz elektrárny velmi zajímavé. K charakterizaci lokality byly vzorky vody odebrány celkem třikrát v projektech VODAMIN II a GeoMAP. Složení je srovnatelné, pouze environmentální hodnoty vykazují mírné rozdíly. Teplota vody kolísá mezi 25 a 28 ° C. Hodnoty pH jsou v neutrálním rozmezí 6,5 až 8,0. Důlní voda voda vykazuje mírnou mineralizaci 0,8 mS / cm, což je potvrzeno stanovením koncentrací prvků a aniontů (tabulka 3.2). Kromě očekávaných alkalických iontů (zemin), stejně jako Cl a TIC a Fe a Si, lze další složky nalézt pouze v rozmezí µg / L nebo pod detekčním limitem.

	Sulfát	Chlorid	TIC	Ca	Fe	К	Mg	Na	Si
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
MR1 nefiltrovaný	< 5	26,3	171	32,4	4,57	12,1	12,9	92,7	14,9









Z místa odběru vzorků byly naplněny různé filtrované vzorky, aby bylo možné odvodit, zda jsou ve vodě případně koloidně vázané prvky / těžké kovy, což by mohlo představovat riziko, pokud jde o usazeniny v systému důlní vody. Hliník, měď, malé množství železa a zinku by mohly takový potenciál dodat (viz také Obrázek (vpravo)). Ačkoliv se jedná pouze o malé rozdíly, velké množství vody může mít za následek větší a relevantnější množství usazenin. Vysoká TIC ve srovnání s ostatními umístěními projektu VODAMIN II může také hrát roli v procesu zanášení, jelikož dochází například ke srážení uhličitanů.



Obrázek 6: (Hlavní parametry (vlevo) a obsahy prvků různých stupňů filtru (vpravo) čerpací stanice MR1 (ELF = elektrická vodivost) (Oppelt et al. 2020c). T ve ° C, hodnota pH, hodnota pE, elektrická vodivost v mS / cm.

Počáteční výzkum možných materiálů a povrchů, které by mohly omezit znečištění, byl také proveden v projektu VODAMIN II; na základě těchto výsledků bylo vybráno osm různých materiálů nebo povlaků pro první sérii testů na čerpací stanici MR1. Ty jsou uvedeny v Tabulka .

Číslo materiálu	Značení
1,4401	X5CrNiMo17-12-2
2,4819	NiMo16Cr15W
2,4675	NiCr23Mo16Cu
1,4301	X5CrNi18-10
3,7025	JIS H4600 TR270C (Titan)
1,4539	X1NiCrMoCu25-20-5
1,4547	X1CrNiMoCuN20-18-7
1,4401	X5CrNiMo17-12-2 (Nano-Ag-vrstva)

Tabulka 3: Přehled povrchů a materiálů použitých ve zkušebním zařízení během první série zkoušek

Za účelem kvantifikace možného vlivu materiálů a povrchů na znečištění byla vyvinuta metoda optického vyhodnocení obrazu. Metoda je ve zjednodušené formě zobrazena na Obrázek . Nejprve je fotka jednotlivých desek vybarvena do šedých úrovní a poté jsou všechny oblasti, které jsou pod mezní hodnotou úrovně šedé, vybarveny červeně, takže to zahrnuje všechny oblasti desek, které nejsou znečištěné. Úroveň znečištění je považována za další charakteristickou hodnotu, přičemž deska je zabarvena v závislosti na tloušťce usazenin (tmavší šedá úroveň = silnější usazenina). Barevná škála se pohybuje od žluté (tenké usazeniny) přes červenou až po černou (silné usazeniny).











Stärke der Verschmutzung

Obrázek 7: Metodika pro vyhodnocení fotografií experimentu se zkušebním zařízením tepelného čerpadla. Foto Platte = Fotografická deska; Einfärbung in Graustufen = Obarvení ve stupních šedi; Anteil der Verschmutzung = Podíl znečištění; Stärke der Verschmutzung = Úroveň znečištění.

Mezní hodnota pro stupeň znečištění byla navržena na základě nové neznečištěné desky. Poměr mezi znečištěným (šedým / černým) a neznečištěným (červeným) povrchem představuje stupeň znečištění, což umožňuje srovnání materiálů a povrchů. Čím nižší je tato hodnota, tím lepší je povrchový antivegetativní účinek.

Výsledky stupně znečištění vytápěním jsou zobrazeny na Obrázek 8. Nejlepší výsledky poskytují následující povrchy a materiály:

- NiMo16Cr15W
- NiCr23Mo16Cu
- JISH4600TR270C (Titan)
- Stříbrný nano povlak



Obrázek 8: Porovnání stupně znečištění materiálů a povrchů použitých v první sérii testů na MR1 (režim ohřevu). Verschmutzungsgrad in % = Stupeň znečištění v %.

Porovnání s výsledky zkoumání procesu chlazení (Obrázek 9) ukazuje, že u téměř všech povrchů došlo k většímu znečistění než při procesu zahřívání. Ukazuje to také průměrný stupeň znečištění všech použitých materiálů a povrchů: u chlazení je to téměř 75%, u ohřevu kolem 68%. Stejné čtyři povrchy a materiály jako v režimu vytápění však dosahují nejnižší úrovně kontaminace.











Obrázek 9: Porovnání stupně znečištění materiálů a povrchů použitých v první sérii testů na MR1 (chlazení). Verschmutzungsgrad in % = Stupeň znečištění v %.

Porovnání úrovně kontaminace mezi NiMo16Cr15W a stříbrným nanopovlakem ukazuje, že při použití NiMo16Cr15W není kontaminace na desce rovnoměrně rozložena. Nízká úroveň znečištění vyplývá hlavně z téměř neznečištěné oblasti vpravo dole (a). Díky stříbrnému nanopovlaku je kontaminace rovnoměrněji rozložena a celkově méně výrazná, což by mohlo mít pozitivní vliv na množství tepla, které lze přenášet. Tyto rozdíly musí být podrobněji zkoumány v dalších experimentech.



Obrázek 10: Porovnání znečištění desek tepelného výměníku (stupeň znečištění konkrétní desky) z NiMo16Cr15W a se stříbrným nanopovlakem (režim chlazení). Verschmutzungsgrad = Stupeň znečištění.









4 Shrnutí a výhled

Geotermální energie z důlní vody je inovativní a obnovitelnou alternativou pro poskytování energie k vytápění a chlazení. V současné době existuje po celém světě 42 zařízení a byly vypracovány konkrétní studie potenciálu na jiných místech a v některých případech byla zahájena výstavba. Přesto stále existuje značný nevyužitý potenciál, například v Krušných horách na saské a české straně. Na čerpací stanici MR1 poblíž Mariánských Radčic (CZ) se každou hodinu čerpá 100 m³ teplé pitné vody, což by stačilo k celoročnímu zásobování tepla velké části okolní komunity. Alternativně by bylo možné teoreticky zásobovat teplem skleníky (např. pro hlávkový salát a špenát) o rozloze až 258 hektarů. Existuje však také problém s energetickým využitím důlní vody v důsledku tvorby znečištění ve výměníku tepla. Množství přenášeného tepla je významně sníženo a tlaková ztráta se zvyšuje v důsledku usazenin, které se tvoří na deskách výměníku tepla v důsledku zatížení přenášených důlní vodou. V důsledku toho trpí účinnost systému a je nutné pravidelné čištění, které způsobuje prostoje. Za účelem prozkoumání způsobů, jak toto znečištění omezit, byly ve zkušebním zařízení (geotermální systém důlní vody v laboratorním měřítku) provedeny s různými materiály a povrchy testy in situ. Zkušební zařízení bylo instalováno na čerpací stanici MR1. Bylo zjištěno, že ohřev důlní vody (režim chlazení, stupeň znečištění = 75 %) vede v tomto místě k poněkud většímu znečištění, než když se ochladí (režim vytápění, stupeň znečištění = 68 %). Bez ohledu na provozní režim bylo nejlepších výsledků dosaženo u dvou nerezových ocelí, titanu a stříbrného nano povlaku. Do jaké míry budou tyto výsledky potvrzeny, ukáží budoucí studie na jiných místech a s jinými materiály a povlaky.

Literatura

Batchelor T, Curtis R, Ledingham P, Law R (2015) Country Update for the United Kingdom (Aktualizace pro Spojené království): ID papíru: 01076. V: International Geothermal Association IGA (ed) Proc. of World Geothermal Congress 2015 (Mezinárodní geothermální asociace IGA (ed) Proc. světového geotermálního kongresu 2015)

Projekt společnosti Bauconzept Dresden GmbH: Využití geotermální důlní vody ve Freibergu

Společnost BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Federální asociace pro energii a vodní hospodářství) (2018), Zemní plyn v zahradnictvích - optimální využití energie ve sklenících, Berlín, online: https://www.gewerbegas.info/fileadmin/Public/PDF_Sonstiges/Erdgas_Gewerbe/Erdgas_Gaertnereien.pdf, zpřístupněno dne 27.04.2021

Debes C (2012) Minewater geothermal energy in Europe - Pilots in ReSource and Remining LOWEX (Geotermální energie z důlních vod v Evropě - průkopníci v oblasti využívání zdrojů a využití LOWEX) V: Debes C (ed) 2. Workshop Minewater - Renewable Energy (Důlní voda - obnovitelná energie): ReSource - Turning Problems into Potentials (Proměna problémů v potenciál), Eisleben

Grab T, Storch T, Gross U, Kleutges J, Grötzsch S (2010) Geothermieanlage zur Grubenwassernutzung für Heizung (200 - max. 670 kW) und Kühlung (155 - max. 500 kW (Geotermální systém pro využití důlní vody pro vytápění (200 - max. 670 kW) a chlazení (155 - max. 500 kW)). V: GtV - Bundesverband Geothermie e.V. (ed) Der Geothermiekongress 2010 (Geotermální kongres 2010)

Grab T, Storch T, Groß U (2018) Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken (Energetické využití pitné vody ze zatopených dolů). V: Bauer M, Freeden W, Jacobi H, Neu T (eds) Handbuch Oberflächennahe Geothermie (Příručka pro povrchovou geotermální energii). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 523–586

Guo P, He M, Zheng L, Zhang N (2017) A geothermal recycling system for cooling and heating in deep mines (Geotermální recyklační systém pro chlazení a vytápění v hlubinných dolech). Applied Thermal Engineering (Aplikované tepelné inženýrství) 116:833–839. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.116

Hall A, Scott JA, Shang H (2011) Geothermal energy recovery from underground mines. (Obnova geotermální energie z podzemních dolů). Renewable and Sustainable Energy Reviews (Recenze obnovitelné a udržitelné energie) 15:916–924. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.007

Jenk U (2020) Standortvortrag Königstein (Místo přednášky Königstein). Důlní voda jako regenerativní zdroj energie v celé těžební oblasti Erzgebirge/Krušnohoří 4. Workshop GeoMAP, Freiberg









Případová studie společnosti Johnson Controls - Hohe Heizkosten sind heilbar (vysoké účty za topení jsou řešitelné): Důlní voda slouží jako zdroj energie pro dvoustupňová tepelná čerpadla čpavku v okresní nemocnici ve Freibergu. http://www.johnsoncontrols.com/de_de/-/media/jci/be/germany/solutions-by-industry/files/bts case study hospital freiberg de.pdf. Zpřístupněno dne 10. září 2018

Kissing H (2009) Thermische Nutzung des Grubenwassers der Schiefergruben der MAGOG GmbH & Co KG in Schmallenberg/ Ortsteil Bad Fredeburg (Tepelné využití pitné vody z břidlicových dolů společnosti MAGOG GmbH & Co KG v okrese Schmallenberg / Bad Fredeburg), Bochum

Korb MC (2012) Minepool Geothermal in Pennsylvania. (Geotermální důlní voda v Pensylvánii) V: Department of Environmental Protection Pennsylvania (ed) 14th konference o rekultivaci opuštěných dolů: Nové hranice v rekultivaci.

Lagerpusch, K. (04.02.2010) Stellenwert Bergbau – Geothermie in Sachsen (Význam těžby - geotermální energie v Sasku), Bad Schlema

Zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii (2012) Závěrečná zpráva: Program financování "Immissions- und Klimaschutz einschließlich der Nutzung erneuerbarer Energien" (Imise a ochrana klimatu včetně využívání obnovitelných energií): Výsledky v období let 2000-2008

Mineralienatlas - Fossilienatlas. (Atlas minerálů- atlas fosilií). (2015) https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Deutschland/Sachsen/Erzgebirgskreis/Marienberg%2C%20Revier/Mari enberg/Pobershau

Myslil V, Frydrych MSV (2005) Geothermal Energy Potential of Czech Republic (Potenciál geotermální energie České republiky). V: Proceedings World Geothermal Congress (Sborník světového geotermálního kongresu)

Oppelt L, Pose S, Grab T, Fieback T (2020a) Geothermische Nutzung von Grubenwasser zur regenerativen Energieversorgung (Geotermální využití důlní vody pro zásobování regenerativní energií). Geothermische Energie (Geotermální energie):25–27

Oppelt L, Pose S, Grab T, Fieback T (2020b) Regenerative Energiegewinnung aus Grubenwasser (Regenerativní výroba energie z důlní vody). Acamonta 27:47–51

Oppelt L, Kaplin K, Grimmer M, Grab T, Hoth N, Fieback T (2020c) Grubenwassergeothermie als regenerative Energiequelle -Status quo, Risiken und Potenziale (Geotermální energie důlní vody jako regenerativní zdroj energie - současný stav, rizika a potenciál). Závěrečný workshop projektu VODAMIN II, Freiberg

Oppelt L, Grab T, Pose S, Storch T, Fieback T (2021a) Mine water geothermal energy as a regenerative energy source - status quo and results from five years of monitoring (Geotermální energie důlní vody jako regenerativní zdroj energie - status quo, vyplývá z pětiletého monitoringu). Časopis Oil Gas EUROPEAN MAGAZINE 47:15–19. https://doi.org/10.19225/2103054

Oppelt L, Grab T, Storch T, Fieback T (2021b) Versuche zur Reduzierung des Foulings im Wärmeübertrager bei der energetischen Nutzung von Grubenwasser (Pokusy o snížení znečištění výměníku tepla při energetickém využití důlní vody). Výroční zasedání specializovaných skupin ProcessNet pro fluidní procesní techniku a přenos tepla a hmoty

Ramos EP, Breede K, Falcone G (2015) Geothermal heat recovery from abandoned mines: a systematic review of projects implemented worldwide and a methodology for screening new projects (Rekuperace geotermálního tepla z opuštěných dolů: systematický přehled projektů realizovaných po celém světě a metodika prověřování nových projektů). Environmental Earth Sciences 73:6783–6795. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y

Raube, J. (2012) Wärmenutzung aus Grubenwasser in Bochum-Werne (Využití tepla z důlní vody v Bochum-Werne)

Röder U (2012) Geothermie im Fokus der Nachnutzung von Bergbaufolgelandschaften am Beispiel des Zwickauer Steinholenreviers (Geotermální energie v ohnisku opětovného využití post-těžební krajiny na příkladu černouhelného revíru Zwickau Steinhaben): Geotermální využití vody použité k zaplavení

Röder U (2015) Geothermische Nutzung von Flutungswässern aus den Abbauhohlräumen des Zwickauer Steinkohlenreviers (Geotermální využití vody použité k zaplavení těžebních dutin černouhelného revíru Zwickau) : Stav a průběžné výsledky projektu

Seidl M (2020) Zukunft und Entwicklung des Bergbaugebietes Brüx - Budoucnost a rozvoj hornické oblasti Most. Freibergské knihy výzkumů:49–61

Státní podnik Saské řízení nemovitostí a staveb (2013) Informace v médiích: Technická univerzita Báňské akademie ve Freibergu uvádí do provozu geotermální systém pro využití energetického potenciálu štoly Rothschönberger Stolln. 63/2013







Konferenční sborník k závěrečné akci GeoMAP, Freiberg



Sunbeam GmbH (2013) Výzkum energetické účinnosti: Projekt: Geotermální využití důlní vody pro místní vytápění. http://www.eneff-stadt.info/de/pdf/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/geothermische-nutzung-vongrubenwaessern-zur-nahwaermeversorgung/. Přístup k 21. lednu 2013

Ulbricht S (2013) Wieder Pionierrolle für Freiberg (Další průkopnická role pro Freiberg): Projekt "Energetische Optimierung im Kreiskrankenhaus Freiberg" (Energetická optimalizace v okresní nemocnici ve Freibergu) využívá teplou vodu ze supertunelu. Časopis Wochenspiegel - regional:3

Vater A (2007) Geothermie - Nutzung von Wärme aus der Erde (Geotermální energie - využití tepla ze Země), Bad Schlema

Vater A (2012) Geothermische Nutzung von Grubenwasser aus der Grube Schlema - Alberoda (Geotermální využití důlní vody z dolu Schlema - Alberoda)

Wieber G, Ofner C (2008) Geothermische Potenziale gefluteter Bergwerke (Geotermální potenciál zatopených dolů). Výroční magazín

Wismut GmbH (2012) Geothermie in Bad Schlema (Geotermální energie v Bad Schlema): Projekt "Schillerschule" (Schillerova škola)

Wolf P, Lagerpusch KH, Hofmann K (2007) Zur geothermischen Nutzung von Grubenwässern in Sachsen (O geotermálním využívání důlní vody v Sasku). Sächsischer Geothermietag Spezial (Speciál Saského geotermálního deníku): Geothermie und Bergbau (Geotermální energie a těžba), Marienberg









Využití vybraných metod geotechnického monitoringu v polních podmínkách

J. Mališ, M. Klempa, J. Šancer, V. Zubíček VŠB – Technická univerzita Ostrava, Česká republika

Významným fenoménem posledních let je v České republice postupné utlumování hlubinné i povrchové těžby uhlí. Součástí sanace následků těžby je transformace post-hornické krajiny do podoby, ve které ji budeme moci opět využívat pro život, zemědělství, bydlení, průmysl. Tato transformace představuje dlouhodobý proces, ovlivňovaný řadou faktorů. Její významnou částí je stanovení mnoha enviromentálních parametrů pomáhajících určit míru narušení krajiny. K těmto parametrům zcela určitě patří geologické podmínky území – disturbance půdního pokryvu a nejsvrchnějších horninových vrstev, hydrogeologické podmínky – režim proudění podzemních vod, geochemie zemin a hornin spojená často s jejich kontaminací, změny reliéfu krajiny – svahové pohyby antropogenních navážek nebo poklesy krajiny po těžbě a mnoho dalších jevů.

1 Úvod

V rámci sanačních a rekultivačních prací je třeba mít mimo jiné i znalosti z oblasti techniky a technologie průzkumných a vrtných prací, které charakterizují horninové prostředí a pomáhají předcházet mimořádným událostem jako jsou např. sesuvy, poklesy, výstupy podzemních vod, jímání podzemních vod, odvodňování aj.

Cílem příspěvku je seznámit se základními metodami průzkumných geotechnických prací používaných v monitoringu post-hornické krajiny severních Čech.

2 Geotechnické práce pro sledování stability svahů

V současné době slouží vrty také jako velmi důležitý prostředek pro umístění snímacích zařízení pro sledování a hodnocení deformací v horninovém prostředí. Samozřejmě, že na tyto vrty jsou kladeny speciální požadavky. Následně je uveden komplex metod, které využívají vrtného prostředí a používají se pro měření svahových deformací a pohybů:

- přesná inklinometrie,
- měření pórového tlaku,
- extenzometry (pro vodorovné vrty i svislé vrty),
- křehké páskové vodiče,
- geoakustické měření ve vrtech,

měření podélných posuvů na svazích.

Vrty, využívané pro sledování stability skalních stěn a svahů, jsou vrtány běžnými jádrovými rotačními soupravami, vřetenovými i lafetovými, technologií rotačního jádrového vrtání s přímým proplachem, včetně technologie lanového jádrování.

Na inklinometrický vrt nejsou z hlediska vrtání kladeny nijak mimořádné nároky. Jedná se o vrty průměru 112 mm, resp. vrty průměru 93 mm. U těchto vrtů je především nutno zajistit dobrou průchodnost, resp. přímost z hlediska následného propažování polyetylénovými pažnicemi (PE).

U inklinometrických vrtů je největší důraz kladen na správnost vystrojování a osazování vrtu PE pažnicemi. Především je nutno zajistit:









- dokonalé slícování drážek jednotlivých PE trubek (zároveň musí být respektována zásada, že myšlená rovina proložená dvěma protějšími drážkami bude totožná s předpokládaným směrem pohybu svahu);
- u svislých vrtů zajistit maximální svislost osazení pažnic (interpretace výsledků u dokonale svislých vrtů není na rozdíl od šikmých vrtů zatížena chybami);
- vyvarovat se znečištění vnitřku PE pažnic;
- dbát na vodotěsnost spojů PE trubek.

Výsledným stadiem inklinometrického vrtu by měl být vystrojený vrt s upraveným zhlavím, připravený k provádění vlastního měření.

U ostatních metod monitorování, které se provádí ve vrtech (měření pórových tlaků, extenzometrie aj.), zásadními požadavky na vrt jsou:

- jeho dobrá průchodnost a přímost,
- volit průměr vrtu tak, aby byla dobrá manipulace s nářadím (vrtné tyče nebo injekční tyče) při

osazování přístroje do vrtu a při jeho cementaci či obsypu.

Měření se provádí ve vrtech realizovaných z povrchu nebo z důlních děl, např. z průzkumných štol. Komplex metod pro sledování deformací svahů a sesuvů je ilustrován na obr. 1.



Obrázek 1: Metody pro sledování deformací svahů a sesuvů. 1 – povrchový drátový extenzometr, 2 – drátový extenzometr pro lokalizaci smykových zón, 3 – přesná inklinometrie, 4 – řetězový deflektometr pro měření příčného sedání, 5 – víceúrovňový tyčový extenzometr s mechanickým záznamem, 6 – deformetr (měření pohybu po kluzných plochách), 7 – dynamometr (měření předpětí kotev), 8 – hadicová vodováha na měření horizontálních pohybů, 9 – vyhodnocovací jednotka.

2.1 Inklinometrie

Jedná se o základní metodu pro kontrolní sledování a měření velikosti horizontálních pohybů a deformací pod povrchem. Charakteristické je použití při určování smykových ploch, sledování směru pohybů v patách hrází přehrad, sledování opěrných zdí apod. Princip metody je znázorněn na obr. 2.









Odvrtaný vrt se zapaží pažnicemi z umělých hmot s přesnými vodícími drážkami. Následně se provede cementace této kolony. Pažnice musí zasahovat až do prostředí, kde se již neprojevují vlivy přetvárných procesů, tzn., že dno vrtu musí zasahovat až do stabilního prostředí. Tato podmínka zaručí, že údaj měřený ze spodní části vrtu je během provádění periodických měření stálý. Po zapuštění inklinometrické sondy se provádí nulté, referenční měření. Měří se s krokem zpravidla rovným délce sondy. Ve stanovených časových intervalech, daných rychlostí pohybu svahu nebo jejím předpokládaným vývojem, se měření ve stejných hloubkových úrovních periodicky opakuje. Pomocí dvou náklonoměrných čidel se měří odklon od svislice ve dvou navzájem kolmých rovinách A, B. Měření se provádí ve dvou polohách (poloha 0° a poloha sondy o 180° otočené), čímž se vyloučí případná chyba v odečtu. Rozdíly náklonu sondy vůči svislici v odpovídajících si hloubkách reprezentují změnu náklonu úhlu θ, která je převedena přímo na lineární posun Δ = L·sin θ. Progresivní vývoj těchto změn indikuje smykovou plochu zóny pohybu. Vyneseme-li v jednotlivých hloubkových úrovních změny náklonu (resp. posunu) vůči nultému měření, dostaneme tzv. křivku "delta" Δ. Tato křivka vyjadřuje relativní posun osy vrtu v dané hloubkové úrovni. Vyneseme-li v jednotlivých hloubkových úrovních součet změn náklonu od nejhlubší úrovně směrem k povrchu, dostaneme křivku "suma delta" ΣΔ, která udává velikosti vodorovných deformací. Inklinometry pro měření svahových pohybů jsou několikanásobně přesnější než běžné karotážní inklinometry (měří se řádově sekundy stupně). Většina přístrojů pracuje na gravitačním principu, tzn. pohybu hmoty při změně klidové polohy. Azimutální měření se neprovádí, neboť stálá poloha sondy je zajištěna drážkou v pažnici.



Obrázek 2: Princip metody přesné inklinometrie. 1 – vyhodnocovací zařízení, 2 – kabel, 3 – sonda, 4 – vrt, 5 – pažnice, 6 – injekční směs, 7 – vodicí drážky, 8 – měřicí interval, 9 – referenční profil, 10 – měřený profil

2.2 Extenzometrie

Drátový extenzometr se používá pro stanovení velikosti deformací a poruchových zón v tělese svahu, v podzemních stavbách, v násypech apod.

Vlastní těleso víceúrovňového extenzometru (obr. 3) sestává:

- z úvodní kotvy (umožňuje fixaci systému kotev před jejich cementací);
- ze základní kotvy, připevněné na trubce, jež přejímá tlak zaváděcího soutyčí;
- z normálních kotev (počet bývá podle potřeby měření). Jsou rozmístěny mezi základní kotvou a měřicím zhlavím. Jsou průchozí pro nižší kotevní stupně. Každá kotevní úroveň je spojena se zhlavím extenzometru.









Vlastní měřicí zhlaví se skládá z příslušného počtu vnitřních kladek, které jsou spojeny s kotevními úrovněmi; z vnějších kladek, přes které jsou jednotlivé struny napínány pomocí zátěží, a z měřidel a snímačů velikosti posunu.



Obrázek 3: Schéma víceúrovňového extenzometru. 1 – zhlaví s kladkami, 2 – zátěže, 3 – spojovací struna, 4 – normální kotva, 5 – základní kotva, 6 – úvodní kotva, 7 – injektážní trubka, 8 – poruchové zóny.

U tyčového extenzometru jsou struny nahrazeny sklolaminátovou tyčí. Toto řešení vylučuje problémy s korozí strun u drátového extenzometru. Zároveň není nutno předepínat kotvy, neboť se měří posuv tyče extenzometru přímo, mechanickým měřidlem. Celá sestava tyčového extenzometru je v jednom celku a umožňuje velmi jednoduchou manipulaci, zejména u osazování do vrtu není třeba používat vrtné nářadí. Tyčový extenzometr je znázorněn na obr. 4.



Obrázek 4: Tyčový extenzometr. 1 – kotva, 2 – cementace, 3 – zhlaví (mechanický odečet pohybu tyče), 4 – plastový krycí kabel, 5 – laminátová tyč

2.3 Dilatometrické zkoušky

Účelem zkoušky pružným dilatometrem je měření přetvárnosti skalních hornin (dilatometrická zkouška skalních hornin, RDT) a zemin (dilatometrická zkouška zemin, SDT) na základě radiálního roztažení úseku vrtu pod rovnoměrným radiálním zatížením aplikovaným pomocí válcové dilatometrické sondy.

Zkouška se skládá z vložení sondy do vrtu a měření radiálního rozšíření vrtu ve zvolených časových intervalech nebo semi-spojitým způsobem při aplikaci známého radiálního tlaku v sondě. Sonda dilatometru je vybavena poddajnou membránou. Jejím prostřednictvím se vlivem tlakového oleje nebo stlačeného plynu ze sondy přenáší zatížení na stěny vrtu. Deformace stěny vrtu se snímají třemi elektrickými čidly, rozmístěnými v různých výškových úrovních ve vzdálenosti 75 mm od sebe a o 120° vzájemně pootočených. Změny dráhy každého čidla, které je unášeno pláštěm zatěžovací sondy, jsou odečítány samostatně. Přesnost odečtu je 0,025 mm. Např. dilatometrem typu Socossor je možno vyvodit tlak do 30 MPa, hloubkový dosah sondy je 50 m.









V křehkých nebo jílovitých skalních horninách a v podrcených a hustě rozpukaných útvarech, kde je nízký nebo nepřijatelný výnos jádra z hlediska získání reprezentativních vzorků pro laboratorní zkoušky, může být válcový dilatometr použit pro rychlou karotáž vrtů indexové povahy a pro porovnání relativní přetvárnosti jednotlivých horninových vrstev.

Příkladem měřicího zařízení pro dilatometrické zkoušky je dilatometr typu Socossor. Pro tuto zkoušku je optimálním vrtem jádrový vrt o průměru 101 mm. Sonda o průměru 95 mm má snímače deformací s rozsahem 25 mm, tzn., že maximální roztlačení je až na průměr 120 mm. Přesto je použití dilatometru velice omezené právě z hlediska průměru vrtu, neboť vrtné nářadí průměru 101 mm není v ČR běžné a průměr 112 mm v méně kvalitním horninovém prostředí již nevyhovuje (vzhledem k vysokým zatěžovacím tlakům až 30 MPa).

Výhody metody lze spatřovat v získání kvalitních údajů o deformačních parametrech hornin a zemin a rychlost provedení zkoušky (oproti laboratorním podmínkám). Jako nevýhody lze uvést náročnost na čas, techniku a organizaci průzkumu (je-li prováděno při vrtání) a relativně vysoká cena.

Metodu lze s výhodou použít pro zjištění přetvárných parametrů hornin a zemin in situ a to i ve větších hloubkách.



Obrázek 5: Ukázka sestavy pružného dilatometru.

3 Geofyzikální metody pro ověření hydrogeologických podmínek a stability svahů - elektrická rezistivní tomografie (ERT)

Pro ověření hydrogeologických podmínek a stability horninové hmoty ve svazích lze aplikovat principiálně takové geofyzikální metody, kdy měřená veličina je závislá na měřitelném odlišném fyzikálním projevu hledaného parametru horninového prostředí.

Tyto odlišné vlastnosti jsou příčinou rozdílného projevu horninových hmot v měřeném profilu horninového masivu, kdy se jednotlivé kvazihomogenní celky odlišují od svého okolí na základě interpretovaného elektrického odporu, jsou tedy hlavním zdrojem geofyzikálních anomálií. Složitost horninového prostředí (samotné geologické poměry, různý fyzikální projev horninových hmot, někdy i plošně omezená oblast průzkumu a v některých případech intenzívní poruchová pole, způsobují, že jak aplikace geofyzikálních metod, tak i jejich interpretace, je často dosti složitá a obtížná.

Dosavadní zkušenosti při řešení uvedené problematiky ukazují, že nejvhodnějšími metodami pro lokalizaci odlišných kvazihomogenních jednotek v horninovém masivu v malých hloubkách pod









povrchem jsou zejména geoelektrické geofyzikální metody, a to především metoda označovaná jako ERT (elektrická rezistivitní tomografie) a metoda GPR (Ground Penetrating Radar).

Metoda ERT (někdy je používán termín odporová tomografie, případně "multikabel") je v současné době je nejvíce využívanou odporovou metodou při dohledávání podzemních prostor. Z hlediska metodiky měření představuje kombinaci dvou klasických stejnosměrných odporových metod – odporového profilování a odporového sondování. Metoda je aplikována pomocí aparatury ARES. Jedná se o automatický geoelektrický systém ARES-200E. Pří měření se používá speciální multielektrodový kabel (jeden kabel - 8 elektrod). Počet kabelů nazývaných obvykle sekcemi je de facto libovolný, v praxi je však omezen konstrukcí samotného přístroje, a to tak, že maximální počet elektrod může být 250. Při měření touto aparaturou se používají válečkové elektrody – viz obr. 6, který znázorňuje aparaturu, válečkovou elektrodu a kabelovou sekci.



c)

Obrázek 6: Stejnosměrná odporová aparatura ARES 200E pro multielektrodové rezistivitní měření (www.gfinstruments.cz). a) aparatura ARES-200E, b – válečková elektroda jako součást multielektrodového kabelu při měření aparaturou ARES, c) kabelová sekce.

Elektrody jsou rozmístěny v konstantní vzdálenosti mezi sebou na zemském povrchu ve formě: 2D – v profilu, či 3D - v ploše. Elektrody, které jsou neustále ve styku s horninovým prostředím, jsou pomocí počítače, střídavě zapojovány jako proudové (C1, C2), nebo jako měřící (P1, P2). Dokumentace rozmístění elektrod při měření na březích jezera s konstantní vzdáleností mezi nimi 3 m je na obr. 7.











Obrázek 7: Umístění elektrod ERT na profilu P2 na jižním břehu jezera (v pozadí Hněvín).

Zpracování získaných dat se provádí pomocí počítačového programu firmy Geotomo Software – RES2DINV. Je navržen pro inverzi velkých datových souborů (200 – 6500 bodů) a systémem ukládání s velkým počtem elektrod (25 – 1800). Tento program sestavuje z terénního měření odporový profil.

Výsledkem zpracování měření je vertikální izoohmický řez a jeho interpretace provedená interpretátorem – obvykle geofyzikem.

Délka profilů byla podmíněna jednak zvolenou metodikou měření a také požadavkem na dosažení optimálního hloubkového dosahu vzhledem k předpokládané hloubce stabilního podloží. Situace proměřených profilů je znázorněna na obr. 8 a 9.

Změřeny byly celkem 3 profily, z toho nejdříve v prvé fázi profily P 1 na severním břehu a P 2 na jižním břehu po spádnici. Následně pak byly doměřen profil P 3 po vrstevnici na severním břehu, kolmý na P1.

Naměřený i interpretovaný soubor dat jsou soubory typu lognormálního rozložení a tato skutečnost je zohledněna při volbě logaritmického měřítka – volbě kroku intervalu izolinií na interpretovaných vertikálních izoohmických řezech.

Reálný hloubkový dosah měření při použitém systému zvoleného počtu elektrod a použité metodice měření a vzdálenosti elektrod od sebe 3 m byl u profilů P 1 až P 3 cca 25 m. Odpovídal tak předpokládané hloubce výskytu smykových ploch a potenciální změny vlhkosti způsobené epizodicky infiltrací srážek. Takto jsou i vyneseny výsledky interpretace na jednotlivých profilech.









Využitím interpretačního postupu RES2Dinv byly získány 2D rezistivitní (odporové) modely zkoumaného prostředí ve formě vertikálních řezů.

3.1 Příklad profil P 1

Délka profilu byla 333 m, měřeno bylo ve směru cca S-J viz Obr. 1 a 2. Výsledky s použitím uspořádání WSCH jsou znázorněny v příloze 1.1. Na základě získaného odporového obrazu lze vymezit dvě oblasti, které mohou svým charakterem odpovídat oblasti zvýšené saturace pórového systému materiálu vodou (modrá barva). Prvním místem je oblast v metráži 103 m až 168 m v připovrchové zóně (hloubka do cca 2 m), druhou pak oblast v metráži 180 m až 243 m. Dále pak byly zjištěny oblasti se zvýšenou saturací v metráži 57 m v hlubší části profilu a v intervalu od 123 m do 162 m. V metráži 186 až 213 lze v dolní části profilu předpokládat existenci konsolidovaného podloží původního svahu velkolomu Ležáky. Získané výsledky ve formě vertikálního odporového řezu jsou znázorněny na obrázku 10.



Obrázek 8: Situace zájmové oblasti s vyznačenými profily ERT.













Obrázek 9: Situace profilů ERT na severním břehu jezera Most. Šipky označují orientaci profilů při měření.



Obrázek 10: Výsledky získané metodou odporové tomografie (vertikální odporové řezy) na profilu P 1. Čárkovaně vyznačené anomální oblasti naznačující pravděpodobnou existenci zvýšené saturace pórového systému horninového masivu vodou – modrá barva. Červeně je označeno pravděpodobně konsolidované podloží původního terénu před rekultivací.

3.2 Příklad profil P 2

Délka profilu byla 285 m, měřeno bylo ve směru cca SV-JZ viz obr. 3. Výsledky s použitím uspořádání WSCH jsou znázorněny v příloze 1.2. Na základě získaného odporového obrazu lze vymezit oblast, která může svým charakterem odpovídat oblasti zvýšené saturace pórového systému materiálu vodou (modrá barva). Jedná se o oblast v metráži 138 m až 198 m v připovrchové zóně či v mělké hloubce cca









2-8 m. Dále lze předpokládat zvýšenou saturaci v metráži 204 až 250 v hlubší části horninového prostředí cca v hloubce 15 m. Kvazihomogenní celky interpretované ve škále červených barev jsou pravděpodobně konsolidované a málo nasycené partie původního podloží. Získané výsledky ve formě vertikálního odporového řezu jsou znázorněny na obrázku 11.



Obrázek 11: Výsledky získané metodou odporové tomografie (vertikální odporové řezy) na profilu P 2. Čárkovaně vyznačené anomální oblasti naznačující případnou existenci zvýšené saturace pórového systému horninového masivu vodou – modrá barva. Červená barva označuje pravděpodobně konsolidované podloží původního terénu.

3.3 Příklad profil P 3

Délka profilu byla 141 m, měřeno bylo ve směru cca Z-V viz obr. 1 a 2. Výsledky s použitím uspořádání WSCH jsou znázorněny v příloze 1.3. Na základě získaného odporového obrazu lze vymezit oblast, která může svým charakterem odpovídat oblasti zvýšené saturace pórového systému materiálu podzákladí vodou (modrá barva). Jedná se o mělkou zónu v celé metráži profilu ve střední části od povrchu do cca 6 m, na začátku a na konci profilu pak od hloubky cca 3 m do hloubky cca 9 m, s maximy v metráži 35 m a 120 m. Dále pak byla zjištěna oblast s vyššími hodnotami rezistivity v metráži 24 m až 55 m při bázi profilu v hloubce cca od 12 m do 24 m a přibližně ve stejné hloubce se symetrickým obrazem v interpretovaném profilu v metráži 84 m až 114 m. Tato anomálie pravděpodobně odpovídá konsolidovaným materiálům původního podloží. Získané výsledky ve formě vertikálního odporového řezu jsou znázorněny na obrázku 12.



Obrázek 12: Výsledky získané metodou odporové tomografie (vertikální odporový řez) na profilu P 3. Čárkovaně vyznačené anomální oblasti naznačující oblast zvýšené saturace pórového systému horninového masivu vodou – modrá barva. Červená barva označuje pravděpodobně konsolidované podloží původního terénu.









Úkolem analýzy byla dokumentace výskytu podpovrchové vody v nesaturované zóně horninového prostředí. Z interpretovaných profilů ERT, kde byly označeny oblasti s pravděpodobnou zvýšenou saturací v pórovém systému vodou lze usuzovat na silně heterogenní horninové prostředí tvořené různými, převážně pravděpodobně jemnozrnnými zeminami a s různou mírou saturace pórového systému vodou. Jedná se pravděpodobně o pomalý podpovrchový odtok ve směru spádnice původního terénu, tedy cca jižním směrem do jezera na severním břehu a severním směrem na jižním břehu. Výskyt zvýšené saturace je však nerovnoměrný, což zřejmě souvisí s kvalitou materiálu původního podloží a materiálů požitých na rekultivaci. Jedná se o materiály s různou hydraulickou vodivostí. Výskyt podpovrchové či podzemní vody v mělké zóně dokumentují Obr. 13.



Obrázek 13: Výskyt vody v mělké zóně horninového prostředí

4 Závěr

V příspěvku byl představen soubor výzkumných metod geologického průzkumu a geotechnického monitoringu. Tyto metody umožňují měřit in-situ v polních podmínkách různé parametry a jejich změny. K důležitým parametrům zcela určitě patří geologické podmínky území – disturbance půdního pokryvu a nejsvrchnějších horninových vrstev, hydrogeologické podmínky – režim proudění podzemních vod, geochemie zemin a hornin spojená často s jejich kontaminací, změny reliéfu krajiny – svahové pohyby antropogenních navážek nebo poklesy krajiny po těžbě a mnoho dalších jevů.

Každá z uvedených metod je doprovázena příkladem jejího praktického uplatnění v post-hornické krajině. Jednotlivé metody a jim odpovídající technické vybavení je součástí polní laboratoře VŠB-TU Ostrava vybudované za významného přispění mezinárodního projektu GEOMAP.

Součástí polní laboratoře je zařízení pro geologický průzkum, např. tvorbu geologického profilu na základě vyhodnocení vrtného průzkumu, geofyzikální metody, lehká dynamická penetrace. Dále je součástí laboratoře vybavení pro geotechnický monitoring, např. inklinometrické měření, extenzometrické měření, měření hladiny podzemní vody a tlaku pórů, tj. hladinoměry, piezometry.









Zkušenosti se vzestupem hladiny vody po odstavení černouhelné těžby ve společnosti RAG AG

I. Balzer, M. Drobniewski

RAG Aktiengesellschaft

Abstrakt

I dnes se RAG AG spolehlivě vyrovnává s důsledky těžby v bývalých černouhelných revírech Porúří, Ibbenbüren a Sársko. Řešením takzvaných úkolů na věky (hospodaření s důlní vodou, opatření poldrů, čištění podzemních vod) pomáhá RAG v těchto oblastech regulovat vodní bilanci v podzemí i nad povrchem. Hlavní prioritou je zde pitná voda a ochrana životního prostředí. Zejména by mělo být pro budoucí generace zachováno ekologické a ekonomicky rozumné hospodaření s důlními vodami prostřednictvím rozvoje konceptů důlních vod. Implementace těchto konceptů je doprovázena řadou monitorovacích opatření. Lze zde také využít zkušenosti s již dokonanými vzestupy hladiny důlní vody.

Společnost RAG AG (dříve Ruhrkohle AG) byla založena v roce 1968 jako konsolidační společnost německých černouhelných dolů. V té době propojila společnost zhruba 94% produkce černého uhlí v Porúří. V současné době je RAG AG (dále jen RAG) odpovědná za bývalé černouhelné oblasti v Porúří a Ibbenbürenu v Severním Porýní-Vestfálsku (ukončení financování v roce 2018) a za sárský revír v Sársku (ukončení financování v roce 2012). Neboť i po ukončení těžby černého uhlí převezme v těžebních oblastech RAG dlouhodobě odpovědnost. Trvalé úkoly jsou důsledky těžby, které vyžadují neomezená opatření. Patří mezi ně hospodaření s důlní vodou, opatření povrchových poldrů a čištění podzemních vod v některých bývalých lokalitách koksoven a monitorování podzemních vod v kontaminovaných lokalitách.

Jedním z hlavních úkolů RAG je podzemní vodohospodářství a v částech Porúří také vodohospodářství nadzemní. Hlavní prioritou je zde pitná voda a ochrana životního prostředí.

Finančně a technicky nejnáročnějším trvalým úkolem je odvodnění dolů. To platí zejména pro Porúří. Vzhledem k umístění zdrojů podzemní vody, které se používají k výrobě pitné vody, a vzhledem k povaze terénu, existuje v Ibbenbürenu a v Sárském revíru příležitost čerpat důlní vodu bez použití čerpadel. Je zde možné vytvořit přirozený odtok pitné vody přímo do Saaru nebo do Ibbenbüreneru Aa. Předtím, než však bude možné toto zrealizovat, je zapotřebí uskutečnit rozsáhlé výzkumné a schvalovací postupy.

V minulosti byla ochrana sousedních dolů a jejich vytěžení primárním cílem hospodaření s důlními vodami. Po uzavření posledního dolu již není nutné udržovat podzemní důlní dílo v suchu. Dnes se tedy nabízí příležitost optimalizovat odvodnění dolů.

Vzhledem k smlouvě o dědictví podepsané v roce 2007 mezi státy Severní Porýní -Vestfálsko a Sársko s nadací RAG, je společnost RAG povinna rozvíjet a průběžně aktualizovat koncepci dlouhodobé optimalizace hospodaření s důlními vodami. Pro dlouhodobou optimalizaci hospodaření s důlními vodami zajišťuje dnešní koncepce hospodaření s důlními vodami další centralizaci vodního hospodářství. Řízeným zvyšováním na stanovenou cílovou hladinu se mají navzájem propojit dříve oddělené oblasti zvedání vodních hladin a postupně se zvětšovat povodí centrálních vodních hospodářství. Propojení dříve samostatných oblastí zvedání vodních hladin probíhá podzemními průtokovými cestami v budově bývalého dolu. Tyto cesty toku byly vytvořeny spojením jednotlivých černouhelných dolů, často sloučením dolů v minulosti. Z dlouhodobého hlediska bude v Porúří









provozováno pouze šest vodních nádrží. To nabízí příležitost uchránit zejména menší vodní plochy od vypouštění důlní vody. Řeka Emscher má být v budoucnu od vypouštění důlní vody zcela osvobozena. Vzhledem k vyšší hladině vody se také nabízí možnost opustit zbylá podzemní důlní díla, které stále slouží k procesu zadržování vody a převést provoz zadržování vody na moderní princip zadržování vody ve studni provozované ve vrstvě nad povrchem (viz obrázek 1).



Obrázek 1: Rekonstrukce míst sloužících k odvodnění. Wasserhaltung unter Tage = Vodohospodářství v podzemí; Vorfluter = Příjem vody; wasserführende Schicht = Vodonosná vrstva; wasserstauende Schicht = Vrstva zadržující vodu; Hauptwasserhaltung = Hlavní odvodnění; Kleinwasserhaltung = Malé odvodnění; 2 Steigleitungen = 2 stoupačky; Wasserseige = Vodní kanál; Fallleitung = Svod; Schachtsumpf mit Sumpfpumpe = Šachtová jímka s jímkovým čerpadlem; Zubringerpumpe = Napájecí čerpadlo; Sumpf = Kaliště; Wegfall Grubengebäude, Pumpen von Übertage = Odstranění důlních budov, Čerpání z povrchu; Brunnenbetrieb = Provoz studny; Schacht = Šachta; Hüllrohre = Opláštěná trubice; Tauchpumpe = Ponorné čerpadlo; Grubengebäude = Důlní budova.

Při všech renovačních opatřeních má nejvyšší prioritu ochrana životního prostředí a pitné vody. Porúří je s přibližně 5,1 miliony obyvatel největší metropolitní oblastí v Německu a je z velké části zásobováno pitnou vodou z důležitých zvodnělých vrstev formace Haltern v severní Porúří. Koncept důlní vody zde zajišťuje dostatečnou bezpečnou vzdálenost mezi důlní a pitnou vodou.

V roce 2020 bylo na devíti místech v Porúří vytěženo 51,6 milionů m³ důlní vody (viz obrázek 2). Voda z jámy byla vypouštěna do přijímajících vod řek Lippe, Rúr, Rýn a Emscher. Většina získané důlní vody vzniká v jižním Porúří. Je to dáno geologickými podmínkami v Porúří: V jižním Porúří se ložisko uhlí rozprostírá na povrchu. Vrstvy obecně severním směrem klesají a jsou překryty stále silnějším těsnícím křídovým nadložím. Tak může být v jižně položených vodohospodářstvích Heinrich, Friedlicher Nachbar (Mírumilovný soused) a Robert Müser, voda z jámy čerpána již z mělké hloubky a s malou mineralizací. U vodních nádrží na severu mineralizace roste, ale množství vyrobené vody je poměrně nižší.







LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE





Obrázek 2: Hospodaření s důlní vodou v oblasti Porúří – přehled rychlostí dodávek a úrovní přejímky ve vodních provinciích. Ewigkeitsstandorte = Věčné lokace; Sicherungsstandorte = Záložní umístění; Fördermenge 2020 (Mio. m³) = Průtok 2020 (miliony m³); -xxx Annahmeniveau (m NN) = -xxx úroveň přijetí (m nad mořem).

V současné době se hladina důlní vody v některých oblastech Porúří již zvyšuje (viz obrázek 3). To platí zejména pro východní část Porúří (vodní provincie Haus Aden a Vestfálsko) a vodní provincii Lohberg. V centrální Porúří je zvýšení hladiny důlní vody plánováno v blízké budoucnosti.

Každé zvýšení hladiny důlní vody je doprovázeno komplexním monitorováním. Hladiny vody v nádrži jsou pravidelně zaznamenávány trubkami v zasypaných šachtách. Aby bylo možné sledovat kvalitu pitné vody během výstupu, je na některých místech možné získat vzorek vody také čerpací nádobou. Zde je v omezené míře možné srovnání s předpokládanou chemií důlní vody během fáze výstupu. S ohledem na očekávanou kvalitu důlní vody po jejím vzestupu, a když se obnoví provoz čerpadla, mohou zde být vyzískány důležité informace.



Obrázek 3: Stoupající trend in ve vodních provinciích Porúří. Wasserprovinzgrenze = Vodní hranice provincie; Pumpstandort = Místo čerpání; Lotungsstandort = Napájecí stanice; Dokončený vzestup; Konečná úroveň v karbonové vrstvě; Aktuální nárůst; Aktuálně bez nárůstu; Nárůst dokončen, Konečná úroveň v nadloží









Aby bylo možné zaznamenat včas potenciální interakce se zvodní v nadloží během nárůstu důlní vody, provádí RAG ve východním a středním Porúří také monitorování napříč všemi hladinami podzemních vod na nízkých úrovních. Různé horizonty podzemní vody se otevírají na jednom místě pomocí většího množství měřicích bodů. Kromě hladiny vody se zde pravidelně provádí také chemická analýza podzemních vod. Spolu s měřením hladiny vody z ložiska v karbonu lze dlouhodobě sledovat a hodnotit vývoj jednotlivých horizontů podzemní vody v souvislosti se vzestupem hladiny důlní vody.

Při uzavření zbývající důlní budovy jámy bývalého dolu Auguste Victoria byly poprvé použity také podzemní měřicí sondy. Tyto in-situ měřící sondy byly vyvinuty v projektu F&E (výzkumu a vývoje) ve spolupráci mezi RAG a post-těžebním výzkumným střediskem. Při konečném uzavření dolu zůstaly v podzemí. Pomocí kabelů, vedených přes plnicí sloupy šachet, dodávají tyto měřicí sondy v reálném čase data o nárůstu hladiny důlní vody v uzavřeném dole. Sondy poskytují informace o elektrické vodivosti, teplotě, směru toku a hladině vody (tlaku). Dosud poskytovaly měřicí sondy velmi spolehlivé výsledky, které odpovídají výsledkům z jiných měřicích metod (např. drážkování hladiny vody). Použití měřicích sond bylo poté implementováno, nebo je plánováno, i na jiných místech.



Obrázek 4: Schematické znázornění programu měření "Tiefe Pegel"(úrovně hloubky). Geplanter Pegel = Plánované hladiny vody; oberflächennahe Grundwasserleiter = podzemní zvodnělé vrstvy; Tiefe Pegel = Úroveň hloubky; Geplante Tiefe Pegel = Plánovaná úroveň hloubky.

Kromě tématu podzemní / důlní vody jsou do procesu monitorování zahrnuta i další potenciální rizika zvýšení hladiny důlní vody. To platí zejména pro odplyňování na povrchu a pro pozemní pohyby.

V zásadě lze při stoupajícím nárůstu hladiny vody očekávat pokles dodávek důlního plynu z ložiska. Díky působícímu hydrostatickému tlaku je zabráněno úniku plynu z pozůstalých slojí. Nicméně potenciální odplyňování budovy dolu je před vzestupem hladiny vody přesně analyzováno a hodnoceno. Tato analýza zahrnuje také povahu nadloží a možné průtokové cesty v dole. Na tomto základě se vyvíjí monitorování a sleduje se odplynění pomocí měřicí technologie. Tímto způsobem lze také definovat varovné hodnoty a v případě jejich překročení je možné zahájit další opatření, tak aby se zabránilo dalšímu riziku.

Téměř ve všech uhelných revírech bylo možné pozorovat po zastavení odvodňování deformace terénu - zdvih. V průběhu rozsáhlých výzkumů byla získána a vyhodnocena řada zjištění o charakteristické velikosti pozemních deformací a jejich prostorovém a časovém vývoji. Na tomto základě je pro oblasti, ve kterých je plánován nárůst důlní vody, provedeno odborné posouzení pro identifikaci potenciálních oblastí deformace terénu. Obecně je třeba poznamenat, že vzestupný potenciál deformací terénu v









průběhu zvyšování důlní vody lze očekávat pouze jako zlomek deformací terénu souvisejících s výkopem. Zdvih povrchu terénu, který se vyvíjí v průběhu vzestupu hladiny důlní vody, je obvykle velmi pomalý, projevuje se na velké ploše a je poměrně rovnoměrný. V přípravě na plánovaný vzestup hladiny důlní vody nechá RAG také analyzovat a posoudit deformace terénu odborníky. Na základě tohoto vyhodnocení je vzestup hladiny vody doprovázen měřením výšky v nadloží. Předchozí měření RAG potvrzují i zkušenosti z jiných oblastí. Deformace terénu se dosud pohybovaly v řádech několik centimetrů. Kvůli těmto stabilním povrchovým pohybům v revírech RAG se dosud neprojevily a rovněž se ani neočekávají rozsáhlé škody související s poškozením povrchu terénu.

Aby bylo možné spojit monitorovací opatření prováděná dříve v Severním Porýní-Vestfálsku v rámci celoplošného monitorování, byl od roku 2020 doprovázen vzestup hladiny důlní vody procesem "integrálního monitoringu" pod vedením MWIDE, MULNV a Vládního obvodu Arnsberg za účasti RAG.

Cílem integrálního monitoringu je sestavit komplexní dokumentaci vzestupu hladiny důlní vody a jejích dopadů na životní prostředí. Za tímto účelem je monitorovací proces rozdělen na nadřízenou celostátní řídící skupinu, dočasné tematické koncepční skupiny na téma odplyňování, pohybu vody a půdy a regionální pracovní skupiny. V regionálních pracovních skupinách probíhá pod vedením Vládního obvodu Arnsberg operativní implementace koncepcí, která je podporována externím poskytovatelem služeb.

Kromě oblastí centrálního zadržování vody existují v Porúří také oblasti, které dnes již nejsou zadržovacími opatřeními ovlivňovány. Tyto oblasti se nacházejí hlavně v jižní a východní části Porúří. Jedním z příkladů je bývalý důl Königsborn v okrese Unna.

Důl Königsborn byl uzavřen v roce 1981. Odvodňování tam původně pokračovalo, aby byl ochráněn sousední důl na východě. Kvůli výstavbě vysokotlaké přehrady mezi oběma doly došlo v roce 1996 k opuštění odvodňovacího zařízení Königsborn. Od té doby se hladina vody v této oblasti vyvinula nezávisle. Od roku 1996 do roku 2020 vzrostla hladina vody o více než 900 m. Od roku 2012 došlo ke znatelnému zpomalení vzstupu hladiny důlní vody. Podle předpovědi je výška hladiny tlakové vody v současnosti kolem +40 m nad mořem. Další nárůst lze sotva zaznamenat.

Tento vzestup hladiny důlní vody byl doprovázen komplexním monitorováním v rámci citlivostní analýzy. To zahrnovalo následující prvky:

- Záznam vodních hladin:
 - Hladina důlní vody v šachtě Königsborn 4
 - Hladiny podzemní vody v "hlubokých úrovních"
 - \circ $\;$ Hladiny podzemní vody v horní úrovni podzemní vody
- Záznam podmínek odtoku ve vybraných povrchových vodách
- Měření elektrické vodivosti podzemní vody u zdrojů a měřicích míst podzemní vody
- Měření k získání záznamu svislých pohybů země

Pozornost se zaměřila - zejména v případě vrchní zvodnělé vrstvy poblíž nadloží, na oblasti, ve kterých lze při současných citlivých podmínkách použití očekávat účinky vzestupu hladiny důlní vody. Zde byla zřízena nová měřicí místa podzemní vody. K dnešnímu dni došlo pouze k čistě klimatickému vývoji hladiny podzemní vody v horní úrovni podzemní vody. Účinky vzestupu hladiny důlní vody nejsou dodnes patrné. Rovněž není patrné žádné znatelné zvýšení odtokových podmínek na povrchových vodách v důsledku vzestupu hladiny důlní vody. Doposud nebyl zjištěn žádný trend v měření elektrické vodivosti. Elektrická vodivost podléhá velkým výkyvům v závislosti na ročním období a výtlaku pramene. Pouze dvě hluboké úrovně, ležící severně od oblasti Königborn, vykazují mírný nárůst od roku 2004 do roku 2015. K tomu však nedocházelo nepřetržitě. Hladiny podzemních vod se od května 2015 stabilizovaly a dodnes vykazují pouze výkyvy způsobené klimatem.











Obrázek 1: Vývoj hladiny důlní vody a deformací terénu v oblasti bývalého dolu Königsborn. Schacht 4 = Šachta 4; Abgebaute Mächtigkeit in cm = Zmenšená mocnost v cm; Standwasserniveu (m NHN) = Hladina stojaté vody [m VNM]; Deckgebirgsbasis = Základní nadloží; Einstellung der Wasserhaltung Königsborn, Mitte 1996 = Ukončení odvodňování Königsbornu, Polovina roku 1996; ungefährer Hebungsbeginn = přibližný začátek vzestupu; Phase 1 = Fáze 1; Standwasserniveau Schacht 4) = Úroveň hladiny stojaté vody v šachtě 4); Wasseranstieg ca. 900 m = Vzestup hladiny vody cca 900 m; Bodenbewegung (m) – relativ zur Messung 1994 = Deformace terénu [m] – vzhledem k měření v roce 1994.

Při vertikálních deformacích terénu byl zatím pozorován nárůst přibližně 26 cm. Jak bylo pozorováno v jiných černouhelných těžebních oblastech, největší množství vzestupu terénu lze zaznamenat v oblastech s největší mocností těžby. Došlo také ke zvýšení vztlaku při zablokování základního nadloží (viz obrázek 5). Poškození v důsledku vzestupu ještě není známo.

RAG rovněž přebírá dlouhodobou odpovědnost ve svých bývalých černouhelných těžebních oblastech. Zde se RAG může opřít o zkušenosti získané během 50 let historie. Neboť i během aktivních období těžby byla důležitá kontrola důlní vody v oblastech, v nichž těžba neprobíhala. Monitorovací opatření

přinesla mnoho nových informací o vzestupu hladiny vody po ukončení těžby uhlí. Ty jsou neustále rozšiřovány a doplňovány novými technologiemi. Do budoucna vyvinula RAG dlouhodobé koncepce důlních vod, pomocí kterých lze dlouhodobě ekologicky a ekonomicky regulovat vodní bilanci v bývalých černouhelných těžebních oblastech.









Literatura

Melchers, Westermann, Reker: Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen, Berichte zum Nachbergbau (Vyhodnocení procesů vzsetupu hladiny důlní vody, zprávy o těžbě) brožura 1, 2019

RAG AG: (Koncept dlouhodobé optimalizace hospodaření s důlními vodami společnosti RAG akciová společnost pro Severní Porýní-Vestfálsko v souladu s §4 Zděděná dohoda o dluhu za účelem vyrovnání se s trvalými závazky černouhelné těžby společnosti RAG AG v rámci společensky přijatelného ukončení dotované černouhelné těžby v Německu z 14.08.2007, 2014 (Konzept zur langfristigen Optimierung der Grubenwasserhaltung der RAG Aktiengesellschaft für Nordrhein-Westfalen gemäß §4 Erblastenvertrag zur Bewältigung der Ewigkeitslasten des Steinkohlenbergbaus der RAG AG im Rahmen der sozialverträglichen Beendigung des subventionierten Steinkohlenbergbaus in Deutschland vom 14.08.2007)

Ten Thoren: (Zpráva o monitorování měřicích bodů důlních vod v roce 2020, nepublikovaná zpráva jménem RAG) (Bericht zum Monitoring tiefer Grundwassermessstellen im Jahr 2020, unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der RAG), 2021

"Aufgaben für die Ewigkeit" (Úkoly pro věčnost). Internetové stránky RAG AG. https://www.rag.de/, poslední přístup 19.03.2021

"Grubenwasserhaltung" (Hospodaření s důlní vodou). Internetové stránky RAG nadace. https://www.rag-stiftung.de/ewigkeitsaufgaben/grubenwasserhaltung, poslední přístup 19.03.2021

"Integrales Monitoring Grubenwasseranstieg Steinkohle" (Integrovaný monitoring vzestupu hladiny důlní vody v černouhelné oblasti). Internetové stránky Ministerstva hospodářství, inovací, digitalizace a energetiky státu Severní Porýní-Vestfálsko. https://www.wirtschaft.nrw/integrales-monitoring-grubenwasseranstieg-steinkohle, poslední přístup 25.03.2021







Přeshraniční sledování vzestupu hladiny důlní vody v bývalém uhelném dole v Sársku a Lotrinsku

LANDESAMT FÜR UMWELT.

LANDWIRTSCHAFT

SACHSEN

Thomas Walter Ministerstvo životního prostředí a ochrany spotřebitele Sársko

E-Mail: t.walter@umwelt.saarland.de

Uhelný lotrinský revír, nejdůležitější ve Francii, zahrnuje jihozápadní část sársko-lotrinského ložiska, které vede od SV na JZ, o rozloze přibližně 30krát 25 km. Lotrinská uhelná pánev se nachází na severu departementu Moselle na státní hranici s Německem a pokračuje přímo na německé území v Sárské uhelské oblasti.



Obrázek 1: Těžařské oblasti v sársko-lotrinském ložisku (šedé) s umístěním monitorovacích bodů na obou stranách hranice. V blízkosti sárských měřicích bodů jsou známé body průniku vody z nadloží označeny červenými tečkami. Bývalé propojení společného těžebního prostoru s těžební oblastí bývalého dolu Luisenthal je blokováno vysokotlakou přehradou. Wassereinbrüche aus dem Deckgebirge = Průnik vody z nadloží; Schächte mit Messmöglichkeiten = Šachty s měřicím zařízením; Französische Grundwassermessstellen = Francouzský měřící stanice podzemní vody; Deustche GWM = Německá měřící stanice podzemní vody; Verbindungsstrecke zum Rest des Reviers = Napojení na zbytek oblasti Sárska vysokotlakou přehradou (110 bar).

Na francouzské straně zahrnuje 58 šachet na ploše 490 km² (CDF 2003). Na rozdíl od sárské strany o rozloze 740 km² (ELS, 2016), kde začala systematická těžba uhlí znárodněním všech dolů knížetem Wilhelmem-Heinrichem von Saarbrücken již v roce 1750, těžbě na lotrinské straně bránilo dlouho nadloží ložiska tvořené vrstvami středního pestrého pískovce. Lotrinské sloje byly objeveny až v padesátých letech 19. století, ačkoli těžbě z dlouhodobého hlediska nadále bránilo neustálé pronikání vody z nadloží.











Obrázek 2: Tektonická struktura sársko-lotrinského ložiska (dle Metz & Babot, 2003). Těžba probíhala na obou stranách sedla Merlebach, přičemž těžba na středovýchodním západě a východě homburského odskoku byla určena strmými vrstvami jihovýchodního ramene. West = Západ; Ost = Východ; Sattel = Sedlo; Sprung = Odskok; Mulde = Kotlina; Buntsandstein und Rotliegend = Pestrý pískovec a rotliegendská hornina; Sandsteine des Stefan = stephanský pískovec (nejsvrchnější karbon); Konglomerate des Stefan = stephanské konglomeráty (nejsvrchnější karbon); Obere Flammkohle = horní plamenné uhlí; Konglomerat = Konglomeráty; Untere Flammkohle = spodní plamenné uhlí; Fettkohle = Mastné uhlí; Konglomerate von Ste-Fontain = Konglomeráty ze Ste-Fontain; Westfal (vrchní karbon)

Z toho důvodu byly zvýšené objemy vody významně vyšší ve srovnání s vodou nastoupanou v severovýchodní sousední a nekryté pánvi: zatímco v sárských dolech byl zvýšen průměrný objem přibližně na 17 milionů m³ ročně, v přeshraniční oblasti to bylo 45,1 milion .m³ (údaje za rok 2001, Metz & Babot 2003), z čehož pouze 2,2 mil. m³ vzniklo v dole Wandt, v němž se těžilo pouze na sárské straně. Středovýchodní oblast s 31,8 miliony m³ a také západní hydraulicky oddělená oblast s 12,1 milionu m³ měly významně větší množství k nastoupání. Velká část této vody pocházející z červeného pískovce mohla být použita pro veřejné zásobování vodou z důvodu její nízké mineralizace.

Vzhledem k tektonickým podmínkám byly ve středo východní oblasti těženy strmé sloje jihovýchodního křídla sedla Merlebach (Obr. 2), ve kterých bylo, navzdory vyrovnání zaplaveným pískem, možné výrazně zmírnit významně vyšší fenomény osídlení ve srovnání s plošším úložištěm, ale nebylo možné jim zcela zabránit. Deformace lomu, zejména postkarbonské vrstvy zvětrávání ("Grenzletten", viz obr. 5) a vrstvy rotliegendské horniny lišící se svou mocností, které následovaly, vedly kromě částečně značných známek poklesu na povrchu (např. v Nassweileru o délce více než 12 m, CDF 2007) k porušení této přirozené hydraulické bariéry a úniku více vody z nadloží.











Obrázek 3: Dopad těžby na hladinu podzemní vody v zavěšené vodonosné vrstvě, situace v roce 2016 (GIAM 2017). Z hydraulických ponorných trychtýřů na francouzské straně jsou 3 na těžařské činnosti (1, 3 a 4), zatímco ponorný trychtýř v Carlingu (č. 3) je způsobena těžbou podzemní vody v červeném pískovci. Hydraulický účinek homburského odskoku, který jasně odděluje východní část zvodnělé vrstvy od západní části se zrcadlovými rozdíly většími než 80 m, je pozoruhodný. Berghalden = Haldy hornin; Absenkweiher = Ponorný rybník; Grundwassermessstelle = Místo měření podzemní vody; Staatsgrenze = Státní hranice; Grundwassergleichen 2016 = Hladiny podzemních vod (izohypsy) 2016.

Ve výsledku byly vytvořeny prostorné ponorné trychtýře, ve kterých byla hladina podzemní vody částečně ve středním červeném pískovci, dokud nebyla snížena na tento základ. Tyto ponorné trychtýře mají významný a dlouhodobý vliv na chování celého hydraulického systému při společném vzestupu hladiny důlní vody a vody v zavěšené vodonosné vrstvě; jsou proto stále dobře viditelné i dlouho po vypnutí čerpadel (obr. 3). V době aktivní těžby ležely hloubky spouštění v ponorném trychtýři ve Forbachu (číslo 4 na obr. 3) stále ve výšce 80 m nad mořem, ve Freyming-Merlebach ve 100 m nad mořem (číslo 3 v 3), zatímco ponorný trychtýř v dolu La Houve v Creutzwaldu, se téměř nezměnil (Metz & Babot, 2003).

Další zvláštností těžby v této oblasti je složitá historie regionu, o který se kvůli jeho ložiskům uhlí dlouhodobě bojovalo mezi Německem a Francií. Proto byla v Sárské smlouvě z roku 1956, která upravovala návrat Sárska na území Spolkové republiky Německo, Francii udělena rozsáhlá koncesní práva na těžbu na německém území. Proto se k těžebním polím na německé straně přistupovalo z Francie a byla tak spojena s francouzskými doly. Smlouva však rovněž zahrnovala postupné navracení pronajatých ploch, takže v roce 1964 mohl důl Saarbergwerke's Warndt se stavbami Ludweiler a Geislautern zahájit provoz na straně Sárska.

Francouzská těžba dosáhla svého maxima v roce 1964 s roční tonáží kolem 15 600 000 t (CDF, 2003), do konce 80. let 20. století bylo vytěženo kolem 10 000 000 t ročně, ty byly poté postupně odstaveny až do ukončení těžby uhlí v Lotrinsku v roce 2004. Produkce přibližně 800 milionů t černého uhlí (CDF,







2003) vyústila v odhadovaný zbývající objem prázdného prostoru kolem 155 milionů m³, přičemž byla zohledněna také odpovídající zbývající část prázdného prostoru sárských dolů (GIAM 2011).

Poté, co byly v roce 2004 odstaveny francouzské doly a důl Warndt v roce 2005, musela být pro přeshraniční oblast nalezena společná strategie pro provádění a monitorování nárůstu hladiny důlní vody. Vzhledem k tomu, že v hraničních oblastech na německé straně dále na východ již byla těžba dokončena, avšak ve smluvně zabezpečeném využívání důlního plynu se mělo pokračovat, byly zbývající sárské doly hydraulicky odděleny vysokotlakou bariérou o tlaku 110 barů.



Obrázek 4: Zvýšení monitorování a předpovědi pro středovýchodní oblast (zdroj: RAG). Původně odlišný kurz samostatného plnění jednotlivých dolů bude od konce roku 2009 více méně srovnán. Od poloviny roku 2009 do druhé poloviny roku 2012 je vzestup hladiny vody výrazně pomalejší, než se předpokládalo, ale zhruba do září 2015 se nachází nad očekávaným vzestupem. Od té doby byl nárůst pomalejší, než se předpokládalo, což je způsobeno zejména připojením dodatečné čerpací kapacity ve společnosti Schacht Simon v srpnu 2015 (viz také obr. 6). Flutung Warndt = Prognóza zaplavení Warndt / Lorraine - skutečný vzestup; výška [m nad mořem]; Nadloží šachta Simon; Začátek čerpání Simon 5 dne 29. listopadu 2012; Měření Warndt 01.04.2018: 131,8; Měření. St. Charles 3, 05.03. 2018: 130,39; Měření Velsen, Gustav 2; 1. 4. 2018: 131,7; Měření Vouters; 05.03.2018: 133,6; Měření Forbach 05.03.2018: 133,5; Korektura Vouters; Prognóza brgm; úroveň 600 m; Nadloží šachta Simon 5.

V roce 2006 bylo zvýšení důlní vody zahájeno odstavením čerpadel. Od té doby byl nárůst sledován v obou zemích prostřednictvím několika šachet (obr. 4), zatímco paralelní nárůst hydraulicky spojeného nadloží byl dosud měřen pouze na francouzské straně prostřednictvím odpovídajících měřicích bodů (IPA 1 - 3 na obr. 1).

Jakmile byly důlní prostory téměř zcela zaplněny a na konci roku 2014/15 bylo ve Vouters dosaženo výšky 118 m nad mořem, vstoupilo zaplavení do své konečné fáze. Od té doby bylo další zvýšení určeno vyplněním výrazně většího pórovitého prostoru v červeném pískovci a tempo růstu v červeném pískovci je ve srovnání s rychlostí v důlním díle zpomaleno. V případě zvýšeného potenciálu tlaku v důlním díle by mohla mineralizovaná důlní voda stoupat prostřednictvím stávajících hydraulických přípojek v kolektorech používaných pro odběr důlní vody na obou stranách hranice.









Z tohoto důvodu byla čerpadla spouštěna postupně, od 26. listopadu 2009 z důvodu nadloží nejprve v La Houve (oblast západ, hladina 185 m nad mořem, GIAM 2014) a od 29.11.2012 na šachtě Simon (oblast středo východ, hladina asi 84 m nad mořem, GIAM 2014, viz také obr. 5). Účelem je udržovat tlakový potenciál v důlních dílech přibližně 8 m pod nejhlubší vodní hladinou visutého červeného pískovce během procesu výstupu a zabránit tomu, aby důlní voda stoupala do zvodnělé vrstvy.

Při současné rychlosti nárůstu kolem 3,5 m za rok a vzdálenosti ode dna k necelým 60 m, bude dle matematického výpočtu stále trvat asi 15 let, než voda z jímky volně odteče. Jelikož se objem pórů, který má být vyplněn ve starém ponorném trychtýři, zvyšuje s každým metrem vzestupu a vzestup vodonosné vrstvy z červeného pískovce se odpovídajícím způsobem zpomaluje, bude nutné dávku postupně upravovat, aby se udržela úroveň tlaku v důlním díle trvale pod visutou vodonosnou vrstvou.

V roce 2018 mělo ministerstvo životního prostředí a ochrany spotřebitele v Sársku rozpřostřeno 5 měřicích bodů pro monitorování hladiny a kvality vody ve Warndtu. Měřicí body A1 / A2 v St. Nikolaus byly potopeny do hloubky 120 a 275 m, B1 / B2 v Lauterbachu v hloubce 149 a 313 m a C1 v Großrosseln-Velsen v hloubce 43 m, což je hlubší měřicí bod v oblasti nejvyšší vytěžené sloje, zatímco plošší sloj byla naopak filtrována na základně vodonosné vrstvy (obr. 5), takže na stejném místě je možné přímé srovnání tlakových podmínek a chemie podzemní vody v obou podlažích. Rozšíření měřicího bodu bylo provedeno v samostatném vrtu, aby se předešlo problémům s možnými obvody.

Měřicí bod C1 je umístěn v šachtovém pilíři jámy Velsen, takže paralelní vrtání do velké stěny nebylo možné. Vzhledem k poloze na státní hranici, která byla zároveň hranicí koncesní, a jelikož těžba na francouzské straně byla prováděna v několika slojích přesně na této hranici, lze vzhledem k související koncentraci poklesu a z toho vyplývajícímu většímu mechanickému namáhání hornin očekávat zvýšenou propustnost karbonských hornin, a tedy i možnost vzestupu hladiny důlní vody. S jeho polohou v bezprostřední blízkosti plánovaného vyústění do šachty Gustavschacht, kde bude na konci procesu vzestupu převládat nejnižší tlakový potenciál ve visuté vodonosné vrstvě, by měl měřicí bod v počátečním stadiu indikovat všechny vlivy způsobené důlní vodou, která může stoupat do vodonosné vrstvy.











Obrázek 5: Princip sledování gradientů tlaku ve dvojitých měřicích bodech A1 / A2 a B1 / B2. Následkem těžby je narušen těsnící účinek hraniční jílovité a rotliegenské horniny a výsledným systémem trhlin proudí podzemní voda z visuté vodonosné vrstvy do důlního díla (obrázky A a C), ale pouze s tlakovým gradientem nahoru (obrázek B) může voda ze systému jámy pronikat do červeného pískovce. Situation vor der Flutung = Situace před zaplavením; Der grundwasserleiter wird über ... = Vodonosná vrstva je částečně silně odváděna hydraulickými spoji v budově dolu; Geologische Einheit = Geologická jednotka; Buntsandstein = Červený pískovec; Rotliegend,









Grenzletten = Hraniční jíl; Karbon; Hauptgrundwasserleiter = Hlavní vodonosná vrstva; Stauhorizont = Horizont přetížení; Geringleiter, gute Wegsamkeit in alten Grubenbäuten = Malý žebřík, snadná chůze ve starých důlních dílech; Druckgradient = Tlakový gradient; Kohleflöz = Uhelná sloj, Alter Schacht = Stará šachta; Mögliche konsequenzen eine runkontrollierten Flutung = Možné důsledky zaplavení řízeného během; in den hydraulisch tiefer liegenden Bereichen besteht die Gefahr der Gradientenumkehr = V hydraulicky níže položených oblastech existuje riziko obrácení sklonu; Überwachung des Druckgradienten bei der kontrollierten Flutung = Monitorování tlakového spádu v kontrolovaném zaplavení; Grubenwasseranstieg wird durch aktives ... = Růst hladiny důlní vody je udržován nepřetržitě pod hladinou vody ve vodonosné vrstvě (GWL) aktivním čerpáním.



Obrázek 6: Výsledky monitorování na příkladu nových měřicích bodů Sárska pro oblast střed-západ (počáteční náběhová dráha pro šachty je jen zhruba načrtnuta) se zvětšenými úseky. Überlaufniveau im Schacht = Úroveň přepadu v šachtě; Basis Buntsandstein am Schacht = Základna červeného pískovce v šachtě; Wasseranstieg in Schacht = Vzestup vody v šachtě; Wasseranstieg im Schacht = Vzestup vody v šachtě; Wasseranstieg im Schacht = Vzestup vody v šachtě; Anstiegskontrolle durch Pumpen im Schacht = Regulace stoupání pomocí čerpadel v šachtě; Zuschaltung von Pumpen im Schacht = Aktivace čerpadel v šachtě; Basis Buntsandstein am Messstellendoppel = Základ červeného pískovce na dvojitém měřicím bodu; Überlaufniveau im Schacht = Úroveň přepadu v šachtě; Inbetriebnahme der Datenlogger = Uvedení ústředny do provozu; Wasseranstieg im Schacht = Vzestup hladiny vody v šachtě; Pumpen in Vouters außer Betrieb = Čerpadla mimo provoz ve Vouters; Wasseranstieg im Schacht = v Vzestup hladiny vody v šachtě.

Na konci roku 2019 byla měřicí místa vybavena záznamníky dat. Dosavadní výsledky potvrzují tlakový rozdíl mezi oběma patry (obr.6). Tlakový rozdíl mezi měřícími body A1 a A2 je v průměru 25,32 m, v měřících bodech B1 a B2 6,71 m. Zároveň grafy ukazují velmi dobré spojení mezi příslušnými měřicími body a příslušným systémem. Například uvedení datového záznamníku do provozu v měřicím bodě A2 spadne do fáze spouštění poté, co byla čerpadla v hřídeli Vouters znovu uvedena do provozu a současně sleduje spouštěcí křivku ve Voutersově šachtě s mírným posunem hladiny vody přibližně o 1 m a je tedy přesně na úrovni vzestupné křivky v Gustavschachtu (viz vložky na obr. 6), ve kterém je hladina vody měřena pouze jednou ročně.

Rozdíl kolem 15 m mezi úrovněmi v měřících bodech A1 v Sársku a IPA2 na francouzské straně, které lze vidět na obr. 6 s přibližně paralelním průběhem, je vysvětlen odlišnou polohou v ponorném trychtýři. Měřicí bod IPA2 je umístěn podstatně blíže ke středu ponorného trychtýře 3 na obr. 3 a








ukazuje tak relativně nižší potenciál tlaku. Tomu odpovídá rychlost růstu, která je o 1,2 cm / den v měřicím bodě IPA2 také mírně vyšší než v měřicím bodě A1 s 0,99 cm / den. Stejně jako tempo růstu se však tyto rozdíly budou s postupujícím procesem zvyšování i nadále vyrovnávat.

Nelze s dostatečnou jistotou předpovědět, do jaké míry budou tlakové rozdíly potřebné k zabránění vzestupu hladiny důlní vody do zvodně udrženy, i když je dosažena výška volného výstupu. Kromě toho může zhoršení propustnosti důležitých hydraulických spojů, které lze dlouhodobě očekávat v rozbité a silně zastavěné hornině, vést ke zvýšení úrovně tlaku v dole. Proto bude monitorování podzemních vod pravděpodobně z dlouhodobého hlediska nezbytné i po ukončení procesu skutečného vzestupu.

Literatura

73

BRGM (2011): Le Bassin Houiller Lorrain, GIAM 2014, http://www.grand-est.developpementdurable.gouv.fr/IMG/zip/PdF_cle0f2f52.zip

BRGM (2014): Le Bassin Houiller Lorrain, GIAM 2014, Surveillance, http://www.grand-est.developpementdurable.gouv.fr/IMG/zip/GIAM_2014_1120_cle538d75.zip

BRGM (2017): Bassin Houiller Lorrain, GIAM 2017 – Surveillance, http://www.grand-est.developpementdurable.gouv.fr/IMG/zip/giam_02_10_2017_forbach.zip

CDF (2003): Histoire du charbon lorrain, https://web.archive.org/web/20081118163401/

http://www.charbonnagesdefrance.fr/dArticle.php?id_rubrique=166&id_article=648

CDF (2007): Charbonnage de France, GIATM 22.1.2007, État d'avancement des traveaux, http://webissimo.developpementdurable.gouv.fr/IMG/zip/giatm22-01-2007_cle2a831b.zip

 ELS ((Erdbaulaboratorium Saar (Laboratoř geo prací Sársko), 2016): Umožnění zvýšení hladiny důlní vody na -320 m nm ve

 vodních provinciích Reden a Duhamel - hydrogeologické posouzení možného vlivu na povrchové podzemní vody, znalecký

 posudek
 jménem
 akciové
 společnosti
 RAG
 Aktiengesellschaft,

 http://www.bid.rag.de/bid/PDFs/SA/GWA
 Reden
 Duhamel/2
 ELS
 Hydrogeologische%20Bewertung/3222
 GA1
 2017-07

 28
 Grubenwasseranstieg-320mNN.pdf, zpřístupněno dne 10. dubna 2021
 10
 dubna
 2021

METZ, M. & BABOT, Y. (2003): Après-mines 2003, 5-7 Février 2003, Nancy, Colloque International Après-mine 2003, Feb 2003, Nancy, France.









Zkušenosti z modelové technické podpory zaplavení bývalého uranového dolu Königstein

Thomas Metschies Wismut GmbH Chemnitz

Krátké shrnutí

Zaplavení podzemního důlního díla určeného k loužení v regionálním systému zvodnělé vrstvy nastavuje s ohledem na minimalizaci dopadů na životní prostředí zvláštní požadavky na zvolené řešení sanace. Pro technické plánování a schválení nezbytných opatření jsou nutné podrobné předpovědi regionálního hydraulického rozvoje, úniku znečišťujících látek a transportu znečišťujících látek.

Na příkladu bývalého uranového dolu v Königsteinu (Sasko) je představen základní koncept modelu, který se skládá z 3 vzájemně propojených modulů, a také zkušenosti s konstrukcí, parametrizací, kalibrací a verifikací těchto modelů.

1 Historický vývoj

Na počátku 60. let byla na ploše paleolitických pánví vyplněných křídovými pískovci, ležících mezi Pirnou a Bad Schandau v oblasti Saského Švýcarska, zjištěna v rámci rozsáhlého průzkumného programu uranová mineralizace. To vedlo k rozvoji těžebního projektu, který byl zahájen v roce 1963 výstavbou prvních systémů šachet a podzemních chodeb. V uranovém dole Königstein tak byly splněny požadavky, které umožnily od roku 1967 těžbu uranu. Obsah rudy zjištěný ve vrstvách pískovce byl v průměru kolem 600 ppm. Na začátku byly mineralizované oblasti těženy téměř výlučně pomocí konstrukce komorového pilíře. Ke konci 70. let se podmínky těžby stále zhoršovaly, přičemž se významně snížily i druhy rud. To vedlo k myšlence těžby výhradně pomocí podzemního chemického loužení, které zde již bylo testováno polními experimenty. Úplná konverze na chemickou těžbu proběhla v roce 1984, kdy byla použita odpadní kyselina sírová z výroby výbušnin. Technologicky bylo nutné zohlednit různé filtrační vlastnosti mineralizovaných oblastí. Infiltrační loužení probíhalo ve skalách s vysokou propustností, jako je například kvádrový pískovec, přičemž vyluhovací roztok prosakoval mineralizovanými oblastmi od nadloží k podloží. Méně propustné skalní oblasti musely být před loužením zdokumentovány, za tímto účelem byla vytěžena kompenzační komora a blokové sekce byly uvolněny následným odstřelem, takže zde také bylo umožněno loužení. Podzemní loužení bylo udržováno jako proces těžby, dokud nebyla na počátku roku 1990 ukončena produkce. [1]

2 Lokální podmínky

Důl Königstein se nachází v bezprostřední blízkosti národního parku Saské Švýcarsko. Centrální provozní oblasti, včetně haldy, na které byly nebo budou hromaděny zbytky hlušiny, zpracování a úpravy vody v rámci sanace, jsou v dohledu od pevnosti Königstein, což mimo jiné znamená odpovídající zvýšený zájem veřejnosti o sanační práce v dole i na provozních plochách.

Vzdálenost k Labi, coby centrální hydraulické odlehčovací oblasti v údolí Labe, je pouhých 600 m od nejvíce severovýchodně položeného obrysu dolu, přičemž důlní díla zde leží asi 100 m pod úrovní Labe.

Z hydrogeologického hlediska probíhala těžba dolu v nejnižším ze 4 horizontů podzemní vody, které jsou v této oblasti udržovány, každý oddělený zásobníkem podzemní vody. Stratifikace je v zásadě směrována z jihozápadu na severovýchod, což také určuje tok podzemní vody v oblastech tzv. Pirnské pánve, které jsou položeny jižně od Labe. Napájení KPV (kolektorů podzemní vody) probíhá převážně v příslušných výchozích oblastech jižně od dolu, zatímco v oblasti Labského údolí severně od dolu Königstein probíhá odlehčení. Přirozené hydraulické spojení mezi jednotlivými kolektory podzemních









vod v zásadě existuje ve výchozích oblastech na jihu a v tektonických střižných zónách. Kromě toho jsou v důsledku rozsáhlých průzkumných prací v této oblasti, přinejmenším v prvních letech, mezi jednotlivými kolektory částečně vedeny další vodní cesty skrz nedostatečně utěsněné vrty. Během ukončení podzemní těžby byla zachována všechna svislá spojení mezi dolem a povrchem, jako jsou šachty a větrací vrty, stejně tak i mezi zvodnělými horizonty v nadloží. Navzdory opakovaným pokusům o utěsnění jednoho z dřívějších větracích vrtů nebylo možné zcela zabránit průsaku vody.

3 Výzva pro sanaci

Podzemní loužení prováděné v dole je zvláštní výzvou pro sanaci. Průzkum podzemních vod v oblastech tvořených pískovci ukázalo nízké hodnoty pH a vysoké koncentrace solí a kovů. Koncentrace SO4, U a Zn jsou zde zvláště kritické (Tabulka 1).

Parametr	Jednotka	Rozsah hodnot	Max.
рН		0.9–2.5	
Potenciál redoxu	mV	600–800	
Celková mineralizace	g/l	3–25	335
Elektrická vodivost	mS/cm	8–34	98
SO4 ²⁻	g/l	ca. 10	170
U	mg/l	50–500	7
Zn	mg/l	50–400	3
Nitroaromáty	µg/l	2–230	-

Tabulka 1: obsah vybrané látky v podzemní vodě

Kromě podzemní vody je další látkový potenciál vázán v sekundárních minerálech, jak v pískovcové matrici, tak v otevřených úsecích, které se během zaplavení při kontaktu s vodou mobilizují a roztokem vymývají. To vede v první řadě k vysokému počátečnímu vypouštění látek ("first flush" /proplachování), jež bylo možné pozorovat při zaplavování jednotlivých důlních oblastí dolu Königstein. Obrázek 2 ukazuje například u uranu pozorovaný průběh koncentrace v zachycené záplavové vodě.



Obrázek 1: Průběh koncentrace uranu v záplavové vodě uranu; Wasserhaltung Förderbohrlöcher = Odvodňovací podpůrné vrty.









V rámci sanačního konceptu byl před zahájením zaplavení v povodí v západním a severním okolí dolu vybudován celkem 6 km dlouhý systém tras zahrnujících záplavovou oblast, který je oddělen od komunikačních tras do dolu takzvaným pískovcovým pilířem z neporušeného pískovce. Zavedený drenážní systém zajišťuje, že 4. KPV, ve kterém byl důl také vytěžen, lze v této oblasti zcela odvodnit. Spojená důlní díla byla hydraulicky utěsněna pomocí vhodných hrázových konstrukcí. Tyto tzv. kontrolní úseky byly napojeny na bývalou těžní jámu, ve které bylo možné odebírat vodu. Tímto způsobem začalo v roce 2001 souběžně s postupným ústupem z výše položených jižních důlních oblastí postupné zaplavování (Obrázek 2). Po dokončení podzemních ústupových prací byl zachován také prostor šachty, takže po zřízení 2 výrobních vrtů na systému kontrolních úseků a jejich vybavení ponornými motorovými čerpadly, došlo od roku 2009 ke změně odvodňovacího systému. Za tímto účelem byl kontrolní úsek zaplaven a potenciál byl udržován pod úrovní zaplavení dolu. Dosud bylo hydraulicky zajištěno, aby do okolního 4. KPV nevedl žádný odtok.



Obrázek 2: Zajištění dolu Königstein během zaplavování od roku 2001. Flutungsstand = Úroveň zaplavení [m nad mořem]; Wasserhaltung = odvodňovací podpůrné vrty.

Aby se zabránilo překročení nadloží 3. KPV, byla v roce 2013 zaplavena takzvaná podoblast dosažením úrovně zaplavení 140 m nad mořem. Proto je na základě potenciálního rozdílu mezi dolem a nadložím 3. KPV stále třeba zabránit přelivu záplavové vody pomocí vhodných hydraulických spojů.

Požadované konečné zaplavení vytvořením technicky neovlivněných podmínek hydraulického toku v horizontech podzemní vody, však vyžaduje další zvýšení úrovně zaplavení přibližně o 50 m. To je spojeno s obrácením potenciálního gradientu v severních oblastech dolu, což znamená, že lze očekávat odtok v nadloží. Významnému dopadu látek na spodní vody v nadloží by se však mělo, pokud možno, z hlediska vodního práva zabránit. Výsledkem jsou základní rámcové podmínky pro zaplavování. Na jedné straně musí být zjevně omezeno nadbytečné zatížení látkami a na druhé straně lze k omezení vlivu použít také stávající retenční mechanismy v přímé odtokové oblasti. Z důvodu optimalizace procesu zaplavení vede toto k požadavkům na prognózy hydraulických a látkových účinků úkonů zaplavování, kterých lze ideálně docílit pomocí vhodných numerických modelů.









4 Koncept modelu

4.1 Přehled

Celý proces zpracování koncepce sanace a již provedených kroků zaplavení byl proto použit k vytvoření a neustálému vývoji modelové koncepce založené na třech základních prvcích:

- 1. Regionální model toku pomocí komerčně dostupného modelového softwaru SPRING,
- 2. Krabicový model zaplavení dolu FLOODING pomocí programu PhreeqC,
- 3. 1-D odtokové modely v přímo ovlivněných KPV v odtokové oblasti dolu k popisu reaktivního transportu na základě programu PhreeqC.

Základem pro úvahy o hydraulickém modelu je komplexní hydrogeologický systémový model, který byl vytvořen na základě dat z průzkumu a monitorování v období aktivní fáze těžby a následné sanace a je průběžně aktualizován. Základní aspekty pro prohloubení porozumění procesu a spolehlivější parametrizaci byly podpořeny laboratorními a terénními studiemi.

4.2 Regionální model toku

Regionální model toku, který popisuje hydraulické podmínky v oblasti obklopující důl na ploše přibližně 350 km², je v provozu více než 20 let. 4 horizonty podzemní vody včetně hrázových vrstev s celkem 19 modelovými vrstvami jsou zobrazeny v modelu MKP, který obsahuje přibližně 460 000 modelových uzlů a přibližně 530 000 prvků. Tam jsou 3. a 4. KPV, stejně jako obě dělící ucpávky rozděleny do 5 vrstev. Během vytváření modelu byla v modelu zmapována celá doba provozu dolu od jeho ražby. V rámci úředního schvalovacího postupu pro zaplavení dolu je nutná každoroční aktualizace a ověření modelu. V modelu s jednotnou sadou parametrů je tedy mimo doby provozu dolu nyní popsána také fáze zaplavení.

Důležitým prvkem pro konzistentní popis průběhu zaplavení dolu a jeho interakce s MPV v oblasti dolu je podmínka okraje dolu, pro tento model toku speciálně zavedená do programového systému SPRING. Uzly modelu, představující důl v různých modelových vrstvách, jsou kombinovány, aby vytvořily oblast rovnováhy, ve které se vyskytuje potenciál konstantního tlaku. U těchto bilančních oblastí se vodní bilance počítá pro každý modelovaný časový krok. Z informací o těžbě v důlních dutinách a objemech hornin s odpovídající skladovatelnou pórovitostí bylo stanoveno rozdělení distribučního objemu související s výškou. Podle rozdílu mezi přítoky a odtoky stanovenými v časovém kroku se na základě takto stanovených změn ukládání a výše uvedeného vztahu mezi výškou a objemem vzdutí určuje zvýšení nebo snížení úrovně zaplavení v oblasti zaplavení. V souladu s tím je v modelu pro další časový krok znovu jednotně specifikován potenciál v důlních uzlech. To lze popsat pro jednotlivé důlní oblasti v rámci vývoje akumulace v nestabilním běhu modelu. V regionálním modelu toku jsou kvůli vyrovnaným vodním hladinám považovány záplavová oblast v dole a kontrolní úsek za odpovídající bilanční oblasti. Zohlednění technických vodních úkolů, stejně jako odběrů z těchto bilančních oblastí, se považuje za okrajovou podmínku 2. Typ specifikovaný podle naměřených průtoků, a tedy vývoj akumulace v těchto 2 podsystémech, je zvažován v rámci adaptace modelu. Parametrizace modelu tak může probíhat na základě srovnání naměřeného a modelovaného akumulačního vývoje v těchto bilančních oblastech. Dále je důležitým kritériem pro přizpůsobení modelu srovnání vývoje vodní hladiny v měřicích bodech kvality podzemní vody, ležících v regionální oblasti toku, a bilance důlní vody. Důležitými kritérii pro srovnání postupu hráze jsou obě příslušné odchylky vodních hladin mezi měřením a modelem, a to jak postupný nárůst křivky během fáze poklesu (hloubení dolu), tak i opětovný vzestup (zaplavení dolu).

Tato modelová koncepce tak umožňuje prognózy pro definované režimy provozu konečného zaplavení dolu, přičemž řízení záplavového procesu lze popsat odpovídající změnou napájení a odběru vody v záplavové oblasti nebo systému kontrolních úseků.









Regionální model toku poskytuje tímto způsobem specifický vývoj objemů vodních toků na obrysu dolu jak pro epignózu, tak pro prognózu, které jsou zahrnuty jako okrajové podmínky v důlním modelu FLOODING (zaplavení). Odvozené pole toku ve výtoku z dolu a odpovídající množstevní bilance jsou také začleněny do hydraulického popisu reaktivních 1D odtokových modelů.

4.3 Důlní model FLOODING (zaplavení)

Popis vypouštění látek ze zaplaveného dolu se provádí pomocí krabicového modelu, který zohledňuje základní geometrii dolu. Kromě základních úrovní vytěžených v podloží jsou zahrnuty také těžební horizonty umístěné v přilehlých přehradních oblastech také ve 4. KPV, včetně úložišť a zapuštěných oblastí. Za další prvky se považuje také pískovcový pilíř mezi zaplaveným dolem a kontrolním úsekem a samotný kontrolní úsek jako směšovací reaktor. Zatímco základní úrovně zahrnují pouze vyhloubené důlní dutiny, pole popisující vytěžené oblasti jsou reprezentována důlní dutinou a pórovitým prostorem. Obě části jsou hydraulicky spojeny prostřednictvím výměníku, zatímco průtok skrze důl probíhá prostřednictvím odpovídajícího spojení příslušných otevřených dutých důlních částí. Průchod z dolu do kontrolního úseku je výškově diferencován pomocí sloupkových boxů, které mají pouze jeden objem pórů.



Obrázek 3: Vizualizace dolu s oblastmi základní úrovně v podloží a nadložními těžebními oblastmi (vlevo) ve srovnání s odvozenou strukturou modelu. Abbaubereich (4. Aquifer) = Oblast těžby (4. Aquifer); Sandsteinpfeiler (4. Aquifer) = Pískovcové pilíře (4. Aquifer); Kontrollstrecke (4. Aquifer) = Kontrolní úsek (4. Aquifer); Grubenbaue der Grundsohlen (Grundgebirge) = Stavba základních úrovní dolu (Podloží); Flutungsexperimente = Záplavové experimenty.

Základem látkového popisu modelu jsou výsledky záplavových experimentů, které byly provedeny v letech 1995 až 1999, kdy byly zaplaveny izolované důlní oblasti a na základě komplexního monitorovacího a rozšířeného vyšetřovacího programu byly zváženy vodní bilance a vývoj průtoku. Z toho byla odvozena základní sada parametrů, která byla odpovídajícím způsobem přenesena do všech polí představujících důl. Během dalšího přepočtu procesu zaplavení byla provedena úprava souboru dat pouze na základě konkrétních podmínek v jednotlivých důlních oblastech. Stejně tak je např. odpovídajícím způsobem upraven obsah látek v krabicových modelech, které představují převážně konvenčně vytěžené oblasti dolu, jelikož oblasti se zakládkou mají různé charakteristiky s ohledem na řadu parametrů (např. Ca). Pro oblasti, v nichž byla imobilizační opatření realizována před začátkem procesu zaplavení pomocí aplikace roztoku BaCl2, byl oproti tomu mobilizovatelný látkový potenciál snížen.

Ústředním kritériem pro přizpůsobení modelu je vývoj koncentrace v záplavové vodě vypouštěné z kontrolního úseku (Obrázek 3). Pouze zde se nacházejí odpovídajícím způsobem interpretovatelná monitorovací měření, která umožňují integrální přizpůsobení modelu. Měřicí body, které jsou také











Obrázek 4: Srovnání naměřeného a modelovaného vývoje koncentrace v záplavové vodě extrahované z kontrolní sekce, příkladem je uran.

4.4 Reaktivní 1D-model odtoku

Regionální tokové pole popsané v modelu proudění se směry proudění, rychlostmi průtoku a množstvím vody, jakož i látková zatížení určená důlním modelem v místech přenosu do okolních KPV, jsou základními modelovými okrajovými podmínkami pro modely reaktivního odtoku, každý popisuje odvodňovací cestu ve 3. a 4. KPV mezi dolem (zdroj) a Labem (svah). Modelový přístup je založen na možnosti transportu implementované v programu PhreeqC, s jehož pomocí byl postaven 1D reaktivní transportní model. Pro 3. KPV obsahuje tento model 74 modelových buněk, které popisují přibližně 1 200 m dlouhou průtokovou cestu mezi potenciálními přestupními body z dolu do Labe.

Zvláštní výzva vyvstává s parametrizací látek, neboť existuje pouze omezený počet výchozů pro odvození obsahu geochemického a mineralogického materiálu v oblasti po proudu se 2 rozsáhle zkoumanými jádry vrtů Spolu s dalšími výsledky selektivních výzkumů ze stejných horizontů podzemní vody se ukazují z analýzy dat rozsahy reaktivních minerálních obsahů v řádu veličin (Tabulka 2).









Minerální	Jednotka	min.	max.	Průměrná hodnota
Uhličitan-C (Kalcit)	M%	< 0,005	0,03	0,01
Disulphid-S (pyrit)	M%	< 0,01	2,6	0,4
nesulfidové sloučeniny železa	M%	0,028	0,65	0,19
Pot. Kationová kapacita výměny	meq/100g	< 0,02	3,4	1,5

Tabulka 2: Rozsahy reaktivních minerálních obsahů ze zkoumání hornin pro oblast po proudu ve 3. KPV.

Kromě těchto rozsahů parametrů existuje také otázka reaktivního podílu obsahu látky, který je většinou zcela určen při laboratorních analýzách digescemi vzorků. Z rozsáhlého polního testování a různých časových řad měření hladiny vody lze odvodit, že horizont podzemní vody o mocnosti 80 až 100 m, lze sice z hydraulického hlediska považovat za homogenní útvar, stále se však vyvíjejí místní cesty toku, které jsou tedy také charakteristické pro reaktivní transport. To lze také vidět na jádrech vrtů, které se mohou měnit z hlediska barvy – oxidované nebo redukované oblasti -, velikosti zrna, zrnu nebo dokonce trhlin v hloubkách. Proto je pro odpovídající geochemické reakce ve skutečnosti k dispozici pouze část obsahu reaktivních minerálů relevantních pro retenci látek. Navzdory hloubkovým zkouškám v dávkových a sloupcových testech jsou obsahy látek zvažované v modelu pouze odhady, které mají trvalý dopad na dosažené výsledky modelu. Pouze srovnání s podmínkami pozorovanými v terénu umožňuje spolehlivý odhad nakonec skutečně účinných složek reaktivní látky. Ty však vznikají pouze tehdy, jsou-li vyvolány dalšími záplavovými kroky, u nichž je však nutná srozumitelná prognóza. Z koncepčního hlediska tedy zbývá pouze možnost zvážit podmínky, které vzniknou ve formě scénářů. Laboratorní testy kontaktu záplavové vody s pískovcovým materiálem, odpovídající teoretické úvahy a v neposlední řadě modelové úvahy, poskytují hlubší pochopení očekávaných procesů, a tedy i relevantních obsahů minerálů a látek. Adekvátně tomu je konzervativní předpoklad vytvořen ze středních obsahů látek, které jsou poté proporcionálně považovány za reaktivní ve scénářích, které je třeba zvážit. Takže zvažte např. scénáře s obsahem reaktivního materiálu mezi 0,1 % a 10% a použijte je jako základ pro další kroky zaplavení.

5 Výsledky

S představenou modelovou koncepcí bylo zaplavení dolu Königstein, které probíhá od roku 2001, doprovázeno modelovou technologií. V příslušných fázích zaplavení bylo přizpůsobení jednotlivých modelů zaměřeno zejména na jednotlivé procesy. Tímto způsobem bylo možné upravit po částech pískovcový pilíř mezi dolem a kontrolním úsekem, a to po dobu, kdy docházelo v otevřeném kontrolním úseku k podzemnímu odvodnění. S provozem podpůrných vrtů zůstává nyní tento předpoklad parametrů beze změny, zatímco dochází k většímu zaměření se na interakce s prostředím. Vývoj potenciálu ve 3. KPV přímo sousedícím s dolem je obzvláště důležitý, protože potenciální gradient ve vztahu k dolu je zásadní pro množství vody, které se přenáší z dolu, a tedy pro šíření látek mimo okraje dolu. Po rozsáhlém a dlouhodobém snižování hladiny vody v KPV v důsledku důlního provozu sousedícím s dolem, je vzestup v 3. KPV bez napětí poměrně pomalý, takže pokud jde o kvantitativní









stav, stacionární podmínky se budou znovu opakovat až po desetiletí. To lze snadno pochopit pomocí regionálního modelu toku analogického s údaji z pozorování. Proto také dobře předpovědět odpovídající důsledky pro sanační proces s výsledným časovým roztažením záplav.

Zásadní zjištění při přepočtu procesu zaplavení představuje dočasná změna kapacity úložiště záplavové oblasti. Pórovitost matrice, která se vykytuje u pískovce, je charakterizována podílem pórů, které jsou rychle i pomalu zaplňovatelné. Tuto časovou dynamiku nelze v modelech jednoduše popsat. Obzvláště při opětovném snížení úrovně zaplavení má toto velký význam a vyžaduje to odpovídající úpravu parametrů úložiště. Příslušné pořadí je také závislé na rychlosti, s jakou se mění akumulační úroveň.

Zjednodušený krabicový model, využívající program PhreeqC, se ukázal jako vhodný pro popis integrálního výboje. To znamená, že složení zachycené záplavové vody lze dobře popsat z hlediska její změny v čase. Volba jednotné sady parametrů na základě experimentů se zaplavováním je vhodná ve srovnatelném měřítku pro popis oblastí, které dosud zaplaveny nebyly. Úpravy byly nutné pouze tehdy, když se v těžebních oblastech zásadně změnily stávající podmínky těžby. To by bylo opodstatněné a srozumitelné, což by také umožnilo odpovídajícím způsobem upravit dosud nezaplavené oblasti.

Pro popis reaktivního transportu záplavové vody podél řek při odtoku z dolu je za daných podmínek koncepčně vhodný 1D přístup. Porozumění geochemickému systému lze srozumitelně rozvinout ve scénářích efektu. V této modelové fázi je superpozice geochemických efektů složitými procesy proudění stále zvládnutelná. 1D modely přenosu hmoty uzavírají propast mezi hydrochemickými dávkovými modely z procesu hodnocení laboratorních testů v malém měřítku a ve velkém měřítku dynamiky reakcí a přenosu hmoty na stupnici zvodnělé vrstvy.

Nejistoty v tomto zjednodušeném přístupu jsou v zásadě charakterizovány nejistotami v geochemické a mineralogické parametrizaci.

Pro validaci takového koncepčního modelu a výpočet spolehlivých předpovědí jsou požadována měření v prostorovém měřítku popsaná u modelu. Pouze u modelového konceptu validovaného na základě naměřených hydrochemických dat má zvýšení složitosti modelového přístupu od 1D až po 3D smysl.

6 Výhled

Do budoucna je plánováno úplné zaplavení dolu Königstein. Bez jakýchkoli technických opatření má důl zapadat do přirozeného režimu regionálního toku a být obnoven do dobrého kvantitativního stavu podle rámcové směrnice EU o vodě. Zvláštní výzvou je vyhnout se významným látkovým změnám ve vodním útvaru, které obsahuje důl a ložisko. Pokud nelze zcela zabránit přenosu znečištěné záplavové vody do okolních KPV, je třeba zajistit, aby přirozené retenční procesy nebo retenční procesy, které jsou technicky indukovány během povodní, bránily šíření látek do KPV.

V souladu s těmito požadavky mají zvláštní význam pro řízení dalších záplav hydraulické a hydrochemické prognózy. Ukázaný modelový koncept představuje nezbytný základ, přičemž jednotlivé modely mají být dále validovány a odpovídajícím způsobem aktualizovány na základě údajů z monitorování zaznamenaných v dalším kurzu s ohledem na zohledněné procesy, aby se postupně zlepšovala spolehlivost provedených prognóz.

Výsledky modelování odvozené z výpočtů odpovídajících scénářů jsou nezbytným základem pro aktualizaci koncepce zaplavení, technického plánování a nezbytného schvalovacího procesu. Cílem jsou transparentní a srozumitelné předpovědi, ve kterých jsou adekvátně zohledněny stávající nejistoty.









Poděkování

Představený koncept a popsané zkušenosti jsou výsledkem různých šetření, výzkumu a diskusí velkého počtu kolegů ve Wismutu, ale také externích odborníků. Na vývoji příslušných modelů měli rozhodující podíl také kolegové z delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Witten (SPRING) a Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH, Dresden (FLOODING). Na vývoji odtokových modelů se značnou měrou podílel profesor Wolfgang van Berk (TU Clausthal). Děkuji vám všem za spolupráci.

Literatura

[1] Chronik der Wismut (Kronika Wismutu), Wismut GmbH, Chemnitz, 1999.





