



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Sborník

1. 1. konference v rámci projektu GeoMAP

Aplikace inovativních počítačových metod pro
trojrozměrné zobrazení podloží a modely simulací a
prognóz pohybů terénu při opětovném nárůstu hladiny
podzemních vod v důsledku hornické činnosti

Pátek 28. června 2019



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



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014 – 2020



Pořadatel: Katedra mechaniky hornin
Ústav geotechniky
Technická univerzita - Báňská akademie Freiberg
Gustav-Zeuner-Str. 1
09599 Freiberg

Kontakt: Gunther Lüttschwager
Tel.: 03731 39-2975
E-mail: gunther.luettschwager@ifgt.tu-freiberg.de



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



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014-2020



Obsah

Předmluva

Vlivy povrchových, podzemních a důlních vod na stařiny z hlediska bezpečnosti. Dr. Günter Meier.....	7
Prostorová a časová analýza vertikálních pohybů terénu, zaznamenaných pomocí měřicí techniky během těžební fáze v černouhelném revíru Lugau-Oelsnitz Karl-Heinz Löbel	
Vyhodnocení nejistot vertikálních pohybů terénu v důsledku nárůstu hladiny podzemních vod v bývalém hlubinném revíru Oelsnitz /E. detekovaných pomocí radarové interferometrie. Dr. André John	27
Představení projektu GeoMAP: Modelovací, vizualizační a prognostické nástroje pro zobrazování důsledků hornické činnosti a potenciálů nového využití Christin Jahns, Sylvi Hädecke.....	35
Modelování tras proudění podzemní vody a jejího zdržení - relevance pro oblasti stařin Tamara Kolbe, Prof Dr. Traugott Scheytt	41
Prognóza mineralizace důlních vod při zatápění bývalého dolu Ost společnost RAG Marcel Schlegel, Dr. René Kahnt.....	43
Numerické přístupy k diskretizaci a hydraulické simulaci při zatápění hlubinných dolů Timo Kessler, Dr. Michael Eckart, Prof. Dr. Maria-Theresia Schafmeister.....	47
Přehled numerických metod výpočtů v geotechnice Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky	53
DEM pro simulaci důsledků změn podzemní vody v krajinách po ukončení důlní činnosti na příkladu bývalého hlubinného revíru Lugau/Oelsnitz. Gunther Lüttschwager.....	60
Stav trojrozměrného modelování výsypek jako základ pro geotechnické hodnocení povrchového dolu Nochten Roman Zschieschick, Lars Schumacher, Regine Grosser.....	66



Co je GeoMAP?

Cíle

V rámci Programu spolupráce "Česká republika - Svobodný stát Sasko 2014 - 2020" byl iniciován projekt GeoMAP. Jeho účelem je výměna zkušeností o geovědních metodách a modelování jako podkladu pro řešení problémů v oblastech, ve kterých došlo k ukončení důlní činnosti. Cílem čtyř partnerů projektu je zlepšení prognózy různých jevů v oblastech, ve kterých byla ukončena důlní činnost, prostřednictvím nových impulsů pro získávání a vyhodnocování datových sad. Řešeným územím je uzavřený hlubinný důl Lugau/Oelsnitz (Sasko) a povrchový důl Most (Česko).

Těžištěm projektu je vzájemná vědecká výměna mezi partnery projektu. Kromě toho má dojít ke zlepšení komunikace mezi vědou, veřejnou správou a dalšími institucemi. Pro dosažení těchto cílů budou mimo jiné uspořádány čtyři konference, které se budou zabývat hlavními tématy partnerů projektu.

Zapojení partneři projektu

Projektu GeoMAP se účastní Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)), Technická univerzita v Ostravě a Technická univerzita - Báňská akademie ve Freibergu (TU Bergakademie Freiberg). Technická univerzita - Báňská akademie ve Freibergu je zastoupena katedrou technické termodynamiky a katedrou mechaniky hornin.

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Freistaat
SACHSEN



technische
THERMO
DYNAMIK

VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA



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



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014–2020



Numerická simulace pro výzkum dopadů nárůstu hladiny důlních vod

Katedra mechaniky hornin připravuje numerickou simulaci pro predikci dopadů nárůstu hladiny důlních vod na krajinu Lugau/Oelsnitz, ve které byla těžba ukončena. Přitom má být přihlédnuto k hydromechanickým interakcím, kdy budou sledovány dopady nárůstu hladiny důlních vod na strukturu hornin. Na základě toho bude možno formulovat závěry o vyzdvižení nebo poklesu terénu.

Dále mají být vypracovány pokyny pro řešení geotechnických problémů, vztahující se k oblastem, ve kterých byla ukončena těžební činnost. Tyto pokyny mají sloužit jako informační podklad pro obce, orgány veřejné správy a další zájemce.

Financování

Projekt GeoMAP a tato akce jsou financovány z Programu spolupráce Česká republika - Svobodný stát Sasko 2014-2020.



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



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014-2020



Vlivy povrchových, podzemních a důlních vod na stařiny z hlediska bezpečnosti.

Dr.-Ing. habil. Günter Meier

Projekční kancelář Dr. G. Meier GmbH spol. s r.o.

1. Problematika nárůstu hladiny podzemních vod

Při plošném opětovném nárůstu hladiny podzemní vody lze v důsledku zatápění uzavřených hlubinných a povrchových, především hnědouhelných dolů očekávat změny, které mohou vyvolat škodní události. Otázkou jsou i geotechnické vlastnosti závalů a pokryvných útvarů a vývoj nejrozumnějších škodních scénářů na povrchu terénu. Mezi zásadní vlivové veličiny přitom patří typ a velikost důlních objektů, geotechnické a hydraulické vlastnosti nadložních hornin, poměry podzemní vody a způsob využívání povrchu. Tyto veličiny určují především časový průběh deformačních jevů nad hlubinnou hnědouhelnou těžbou, které mohou trvat i po několik staletí. Realizace rizikových scénářů na povrchu terénu v podobě propadů a deformačních procesů ve spojení s ložisky tekutých písků je vyvolávána především šachtami, chodbami, starými ražbami, případně závalovými / deformačními poli a propady terénu (obr. 1). Naznačené problémy a geotechnické souvislosti jasně ukazují, že se v tomto případě jedná o komplexní horninovou, stařinovou a geodetickou tematiku.

V případě propadů terénu jsou významná nejrozumnější stadia průběhu propadu. Geneticky je třeba rozlišovat vývoj od počínajícího nadvýlomu nad důlními prostory, kupolovitých rozvolněných oblastí hornin v nadloží důlních děl a vlastní propady terénu. V každé z příslušných fází může vzniknout labilní rovnováha, podléhající v důsledku menších vlivů dalším změnám a vedoucí k nové labilní rovnováze. Propady přitom neprobíhají kontinuálně v rozvolněném nadloží nebo v oblasti zakládek nebo závalů, ale v závislosti na vlastnostech horninového masívu za podstatného vlivu podzemní vody. Zpravidla je charakteristický diskontinuální průběh propadu s často významnými prodlevami. Významné rozdíly v průběhu závalů a deformací existují i mezi především jemnými písčitymi a jílovitými vlastnostmi

pokryvných útvarů. Významný vliv na diskontinuální průběh závalů má především koheze měnících se vrstev pokryvných útvarů. Řešení vyžadují rovněž otázky možných přesunů hmot závalů a zakládek v narušeném nadloží nebo v důlních dílech. Je nutno přihlédnout ke vznikajícím poměrům proudění včetně možného zamokření na povrchu terénu.



Abbildung 1: Propad severního předměstí města Mostu 20. července 1895 v důsledku vniknutí kuřavek do hlubinného dolu, které bylo zapříčiněno porušením hydrologického režimu (historický snímek, KARL PIETZNER, Teplice)

Další část příspěvku bude věnována problematice vývoje propadů terénu v případě nárůstu hladiny podzemní vody v oblasti hnědého uhlí.

2. Půdně-mechanické aspekty zatápění

Nesoudržná hornina se skládá z pevné fáze (minerální částice), tekuté fáze (voda) a plynné fáze (vzduch). Zatopení důlního objektu posunuje objemové poměry fází ve prospěch tekuté fáze a v neprospěch plynné fáze. Pomocí rovnice (1) lze vypočítat tlak vody u v jednom bodě P horniny.

$$(1) \quad u = g \cdot \rho_w \cdot h_p$$

Parametry rovnice:

g Tíhové zrychlení (konstanta: 9,81 m/s²)

ρ_w Hustota vody

h_p Výška vodního sloupce.

Výška vodního sloupce h_p se zatopením důlního objektu zvýší. Pro zatopený bod P bude mít Výška vodního sloupce hodnotu rozdílu výšek mezi sledovaným bodem P a hladinou podzemní vody. Účinné nebo efektivní napětí σ' , působící v oblasti bodu na minerální směs horniny je podle rovnice (2) závislé na tlaku vody u a totálním napětí σ .

$$(2) \quad \sigma' = \sigma - u$$

Parametry rovnice:

σ účinné nebo efektivní napětí,

u tlak vody.

V případě stoupající hladiny podzemní vody dojde k nárůstu tlaku vody a tím ke snížení efektivního napětí mezi částicemi minerálů. Jelikož absorbovatelné třecí síly mezi částicemi z velké míry závisejí na napětí, které mezi částicemi působí, dojde rovněž k jejich snížení. V důsledku přímé závislosti úhlu tření φ na kontaktním napětí mezi částicemi materiálu dojde k negativnímu ovlivnění i tohoto parametru.

Vzrůstajícím stupněm naplnění póru tekutou fází dochází ke snížení kohézních sil. Sem patří například uvolnění cementace, další hromadění vázané vody (například na jílové minerály a s tím spojený pokles pevnosti), ale i zánik sil, působících v důsledku povrchového napětí na půdní skelet.

Zatopení důlních prostorů, závalů a zakládek a pokryvných útvarů významně změní parametry materiálů. Kohéze a úhel tření nesoudržných hornin jsou výrazně sníženy vysokým obsahem vody. Dochází ke zvýšení objemu primárního závalu, dochází k negativnímu ovlivnění stability okrajů závalu, případně "komínu" závalu a ke snížení stability

starých závalů a zakládek (obr.2). Pozitivními dopady jsou oproti tomu pokles účinku objemové hmotnosti horniny a tím i gravitační síly, vyvolávající zával, který je způsoben vztlačovými účinky vody.

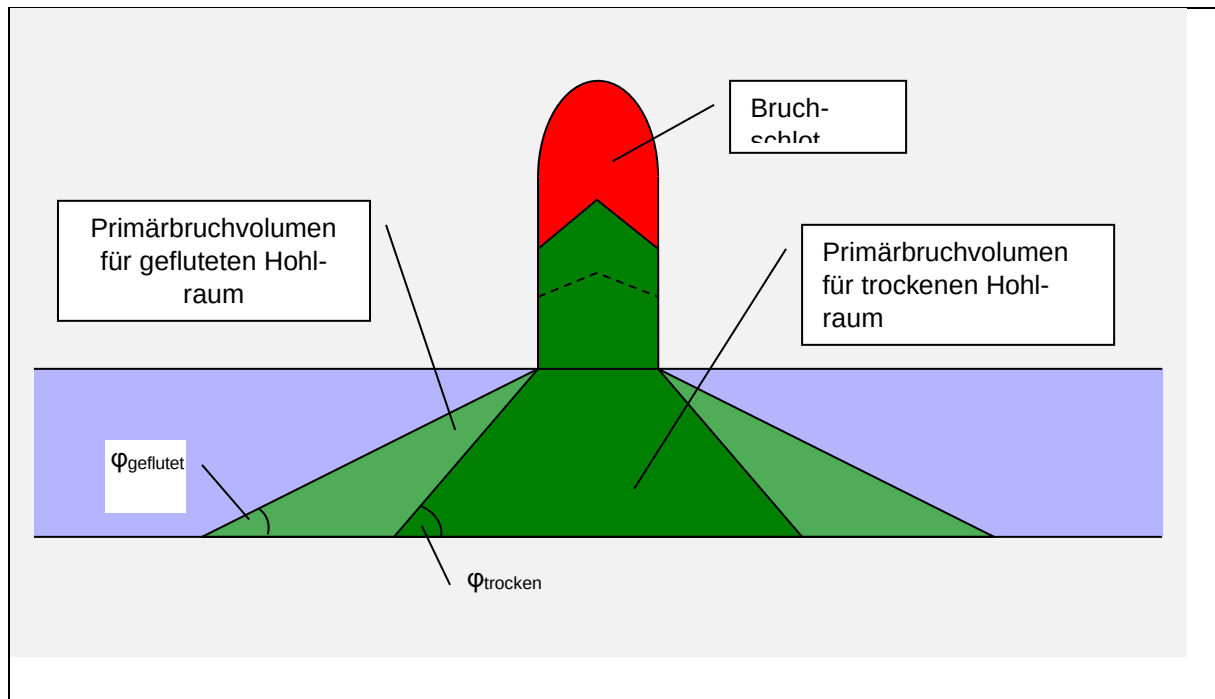


Abbildung 2: Vlivy zatopení na primární objem závalu (schematické zobrazení)

Bruchschlot	Komín závalu
Primärbruchvolumen für gefluteten Hohlraum	Primární objem závalu pro zatopené vyrubané prostory
Primärbruchvolumen für trockenen Hohlraum	Primární objem závalu pro suché vyrubané prostory
geflutet	Zatopené
trocken	Suché

Zvýšená rychlost proudění může mít v důsledku zatopení důlních objektů velmi negativní dopady na pokryvné útvary a zakládku. Rostlá hornina může být erozí a suberozí oslabena, případně odnesena. V případě, že závalová suť podlehne takovému přesunu materiálu, projeví se to dalším zvýšením primárního objemu závalového prostoru. Stejně tak existuje i vliv chemických vlastností vody, použité k zatápění.

3. Geotechnické základy důlních škod

Jako zával je označován postupný "postup" objemového a tedy hmotnostního deficitu v podloží ve směru k povrchu terénu. Tyto nadvylomy nad závaly jsou vyvolávány dodatečnými závaly pokryvných útvarů nad stávajícími vyrubanými prostory, kterým předchází stříhové a ohybové namáhání nadložních hornin. Původní podzemní vyrubaný prostor je přitom nejprve zčásti a později v daném případně zcela vyplněn hmotami, následujících gravitaci. Nadvylom tvořený volným prostorem probíhá ve víceméně svislém,

cylindrickém komínu závalu (obr. 3). Nárůst hladiny podzemní vody urychluje závaly a deformace. Časové údaje jsou využitelné pouze v omezené míře.

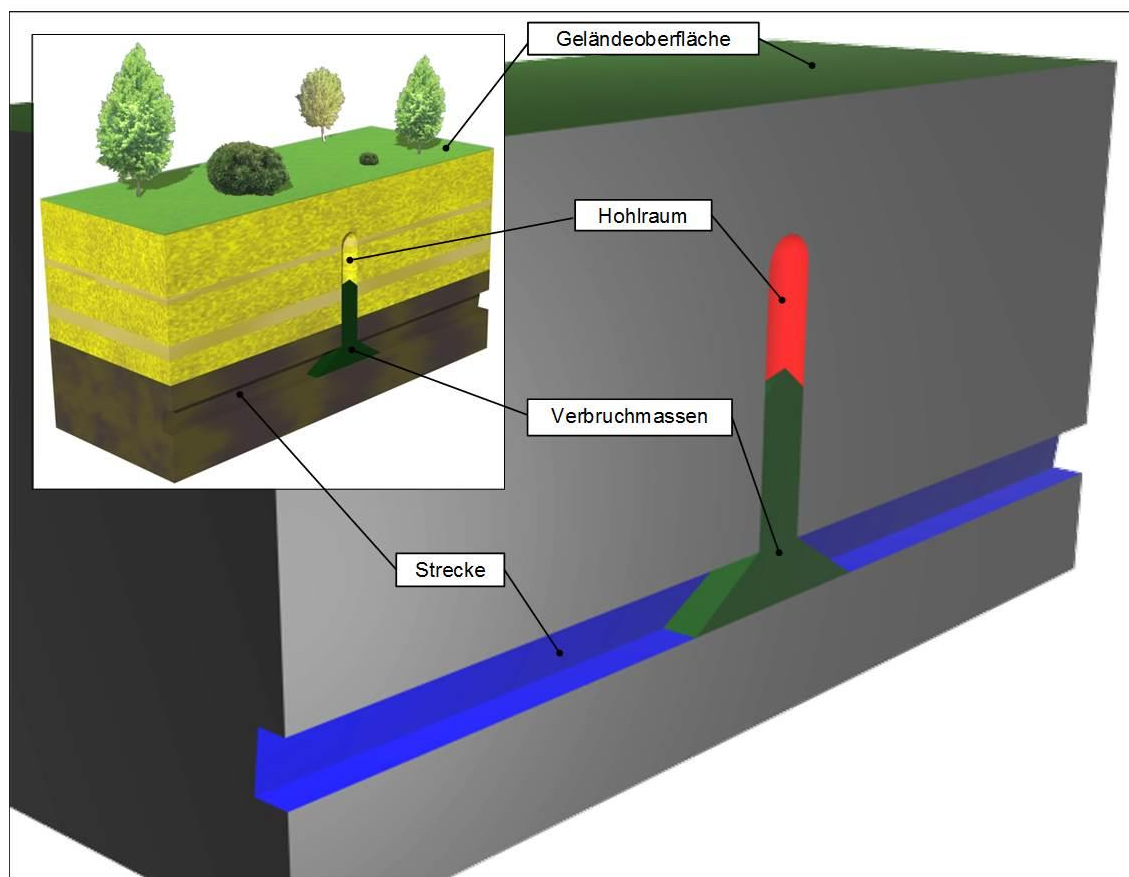


Abbildung 3: Blokové schéma nadvýlomu nad chodbou

Geländeoberfläche	Povrch terénu
Hohlraum	Vyrubaný prostor (dutina)
Verbruchmassen	Závalové hmoty
Strecke	Chodba

[MEIER, J: Statistische Analyse von Tagesbrüchen über Abbaufeldern des Braunkohlen-Tiefbaues und ein Versuch ihrer numerischen Simulation mit dem Programm FLAC.- diplomová práce, Technická univerzita - Báňská akademie Freiberg, 2002 (nepublik.)]

Proces dodatečného závalu může být dočasně přerušen v důsledku vzniku nestability v souvislosti s nasypáváním hmot. Propad terénu představuje předběžnou konečnou vertikální podobu trubkovitého nadvýlomu, který dosáhl povrchu terénu. V souladu s přirozeným svahovým úhlem (synným úhlem) pak dojde k vytvoření svahu a trychtýřovité deprese na povrchu terénu. Vegetační pokryv může výskyt propadů terénu zdržet, nikoli mu zamezit.

Objem původního vyrubaného prostoru v podzemí je v případě těchto závalů označován jako primární objem závalu a závisí na následujících faktorech:

- velikost a geometrie původního vyrubaného prostoru,
- poloha cylindrického výlomu v původním vyrubaném prostoru,
- schopnost závalových hmot vyplnit vyrubaný prostor (nejdůležitější vlivové faktory: zrnitost, sypný úhel (úhel vnitřního tření), fragmentace, zdroj vody).

Numerické vyhodnocení rizika propadu terénu lze zpracovat pomocí bilance závalových hmot podle MEIERA, G. (2001). Tento postup závisí na následujících parametrech:

- s množství nasypaného materiálu (v rm^3/fm^3),
- h výška vyrubaného prostoru (v m),
- l šířka komínu propadu (identická s šířkou porubu, případně chodby),
- b poloviční šíře komínu propadu
- ϕ sypný úhel (v $^\circ$)

[MEIER, G.: Numerische Abschätzung von Tagesbruchgefährdungen in Altbergbaugebieten. - Berichte 13. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, Sonderband Geotechnik, Karlsruhe 2001, S. 95 - 100, URL: <http://www.dr-gmeier.de/onlineartikel/oa0010.pdf>

Z analýzy parametrů vyplývá, že v případě nárůstu hladiny podzemní vody mohou mít negativní vliv především úhel násypu a nasypané množství. V plném rozsahu to ale platí pouze tehdy, pokud úroveň porubu a aktivní komín propadu nebyly před zaplavením pod vodou. V tomto případě by bylo nutno přihlídnout rovněž k možnému dobývacímu horizontu a směru zatápění (samovolné zatápění nebo zatápění z externích zdrojů).

Tyto různé typy propadů terénu lze klasifikovat z genetického pohledu (obr. 4). Numerický odhad propadu terénu je v současné době možno provést pouze pro propad terénu v užším slova smyslu.

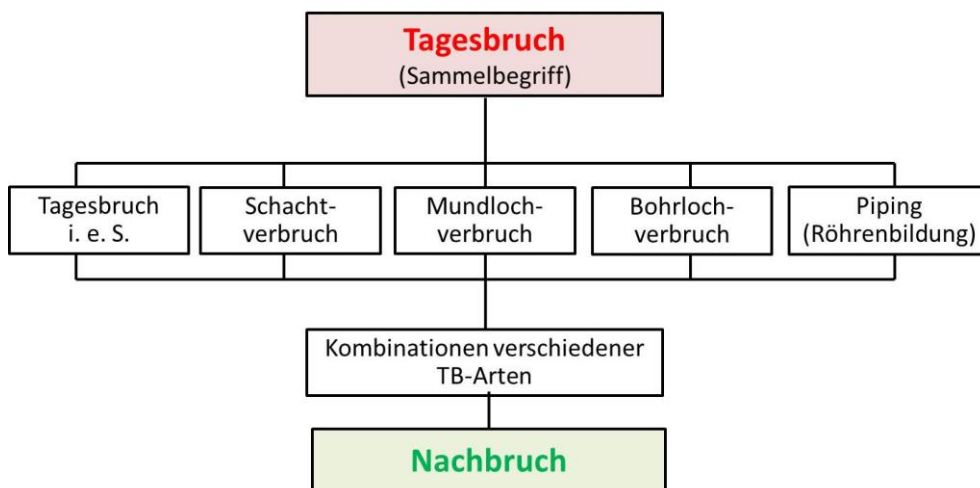


Abbildung 4: Klassifikation propadů terénu

Tagesbruch (Sammelbegriff)	Propad terénu (souhrnný pojem)
Tagesbruch i. E. S.	Propad terénu ve vlastním slova smyslu
Schachtverbruch	Zával šachty
Mundlochverbruch	Zával ústí štoly
Bohrlochverbruch	Havárie vrtu
Piping (Röhrenbildung)	Piping (vytváření trubkovitých tvarů)
Kombination verschiedener TV-Arten	Kombinace různých druhů propadů
Nachbruch	Dodatečný zával

4. Závěry

Změny půdně mechanických vlastností především deformovaných pokryvných útvarů nad hlubinnými hnědouhelnými doly a tím přímé ovlivnění závalových událostí jsou patrné na příkladu extrémní a dlouhodobě působící povodňové a srážkové situace v srpnu 2002. Podle ústních informací Zemského úřadu pro geologii a hornictví Saská-Anhaltska bylo během následujícího roku 2003 na území okresu Burgendlandkreis nahlášeno cca 200 propadů terénu nad hlubinnými hnědouhelnými doly. Dvacetiletá střední hodnota registrovaných událostí činí cca 50 propadů. Markantní nárůst počtu závalů bylo možno zaznamenat zhruba půl roku po srpnu 2002. Tato skutečnost jasně podtrhuje časovou prodlevu při vzniku závalu.

Na základě geotechnického, důlního a geodetického vyhodnocení vývoje propadů terénu v případě nárůstu hladiny podzemní vody lze formulovat následující závěry:

- celkový počet možných propadů terénů se zpravidla zvyšuje pouze tehdy, pokud se v důsledku zatopení změní prostorově geometrické poměry vyrubaných prostor,

- *v důsledku významného ovlivnění půdně mechanických vlastností nesoudržných hornin v případě nasycení vodou dochází během první fáze k urychlení a intenzifikaci procesů závalů a deformací, dochází k vytvoření nových, labilních rovnovážných poměrů,*
- *je nutno počítat s časovou prodlevou zvýšené intenzity událostí,*
- *jsou-li zatápěny vzduchem naplněná důlní díla, je nutno očekávat propady terénu, jejichž průměr sice nebude větší, ale které budou dosahovat výrazně vyšších hloubek,*
- *nárůstem hladiny podzemní vody mohou být reaktivovány závaly a deformace v místech starých propadů a deformačních zón i zasypaných nebo zčásti zasypaných šachet a důlních děl, příčinou těchto procesů jsou nesoudržné horniny, které se poklesy a sedáním přizpůsobují novým rovnovážným podmínkám,*
- *vznik závalů a deformací v důsledku vztlínavých sil a konzervačních účinků vody, působících na starou výdřevu, je nutno očekávat s určitou časovou prodlevou po zatopení.*

Uvedené závěry jasně ukazují, že v případě nárůstu hladiny podzemní vody je nutno počítat s časovým urychlením propadů terénu. Tyto závěry jsou doloženy zkušenostmi a z fenomenologického pohledu porovnáním s dlouhodobě působícími povodňovými událostmi s výskytem extrémních srážek.

Další aspekt se vyznačuje tím, že se propady mohou dále rozvíjet především nad hladinou podzemní vody, protože se zde vyskytují ty nejvíce rozdílné potenciály. Působení gravitace zde může působit bez omezení. Propadům a závalům však zpravidla zamezí jílové nadloží. Pokryvné vrstvy se vrásovitě vyrubaným prostorům přizpůsobují. Tento deformační proces je nutno očekávat během delšího období. V případě písčito-šterkovitého nadloží dochází především k propadům terénu.

Specifická geotechnická situace vzniká v případě ložisek kuřavek v nesoudržných, polosoudržných a pevných horninách. Dochází k ztekucení kuřavek a destabilizaci jejich uložení a to v případě, kdy dojde například vrtem k vytvoření nových spojení do vyrubaných prostor, nebo pokud v důsledku působení koroze dojde ke změnám na výstroji starých vrtů. Pod vodní hladinou pak dochází k přesunům a propady terénu pak vznikají i v nečekaně velkých hloubkách, na což ukazuje několik propadových jevů nad hlubinným dolem.

Dynamické procesy nastávají zásadně pouze tehdy, pokud jsou vytvořena hydraulická spojení s hlubšími vyrubanými prostory nebo pokud dojde ke vzniku antropogenních geodynamických procesů. Jak dokládají údaje z literatury, uzavírají závalové jílové vrstvy v důsledku procesu bobtnání dráhy proudění již během těžby. K jejich aktivaci dochází pouze v případě větších rozdílů v rovnovážném stavu.

Prostorová a časová analýza vertikálních pohybů terénu, zaznamenaných pomocí měřicí techniky během těžební fáze v černouhelném revíru Lugau-Oelsnitz

Dr. K.-H. Löbel

Technická univerzita - Báňská akademie ve Freibergu - Ústav důlního měřičství a
geodézie

Abstrakt:

Ústav důlního měřičství a geodézie Technické univerzity - Báňské akademie ve Freibergu se již od roku 1993 zabývá analýzou a monitoringem vertikálních pohybů terénu v bývalém revíru Oelsnitz/Erzgebirge.

Výsledky 120 letého, téměř průběžného monitoringu pohybů terénu v revíru Lugau/Oelsnitzer jsou přehledně představeny v tomto příspěvku.

Abstract:

The Institute for Mine Surveying and Geodesy of the TU Bergakademie Freiberg has been involved in the analysis and monitoring of vertical ground movements in the former coal mine district Oelsnitz / Erzgebirge since 1993.

The results of the almost continuous 120-year monitoring of ground movements in the Lugau / Oelsnitz mining district are briefly presented in the review.



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



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014-2020

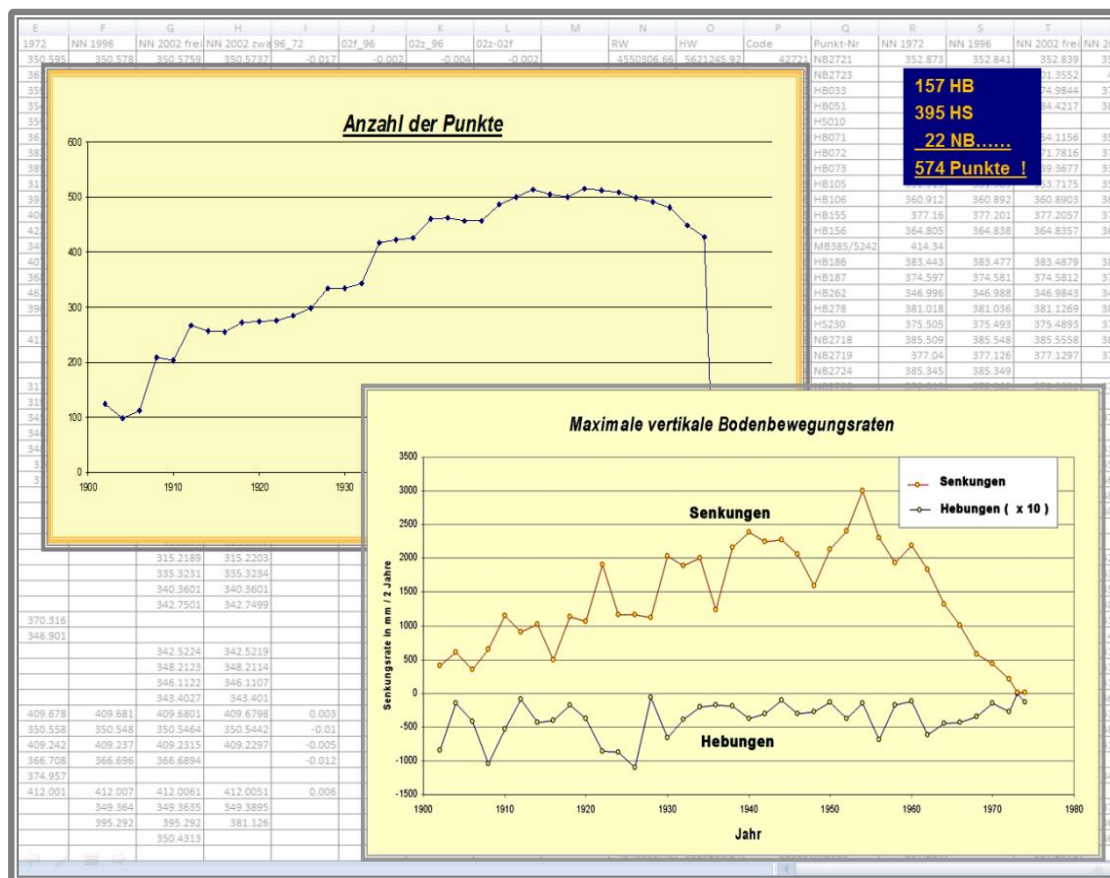


1 Modelování vertikálních pohybů terénu v letech 1900 až 1974

První šachta byla v oblasti Lugau/Oelsnitz vyhloubena již v roce 1835. Aktivní průmyslová fáze těžby v černouhelném revíru Oelsnitz/E trvala přibližně od roku 1850 do roku 1974. Zatápění revíru bylo zahájeno na počátku sedmdesátých let 20. století. V analýze důlních škod, zpracované důlním měřičem Curtem Bayerem, byl předpovězen nárůst hladiny důlních vod zhruba do roku 2030.

Monitoring formou měření nivelizace revíru probíhal ve dvouletém intervalu v letech 1900 až 1974. Bylo-li první sledování nivelizace kolem roku 1900 prováděno s vybavením střední přesnosti, bylo od zhruba roku 1910 k dispozici precizní terénní vybavení (Ni I až Ni V, od roku 1953 Ni 004, od roku 1960 Ni 007 od Carl Zeiss Jena).

Během aktivní fázei důlní činnosti byly zaznamenávány jak poklesy, tak i lokální vyzdvižení terénu pomocí cca 550 bodů. Statistika je uvedena obr. 1.



Anzahl der Punkte	Počet bodů
Maximale vertikale Bodenbewegungsraten	Maximální vertikální míry pohybů terénu
Senkungen	Poklesy
Hebungen	Zdvihy
Senkungen in mm / 2Jahre	Poklesy v mm / 2 roky
Jahr	Rok

Abb.1 : Statistika měřicích bodů pro záznam nivelizace revíru

Některé z vybraných metod jsou příkladně zobrazeny na následujících vyobrazeních. Na obr. 2 je uveden souhrn poklesů a zdvihů v letech 1900 až 1902.

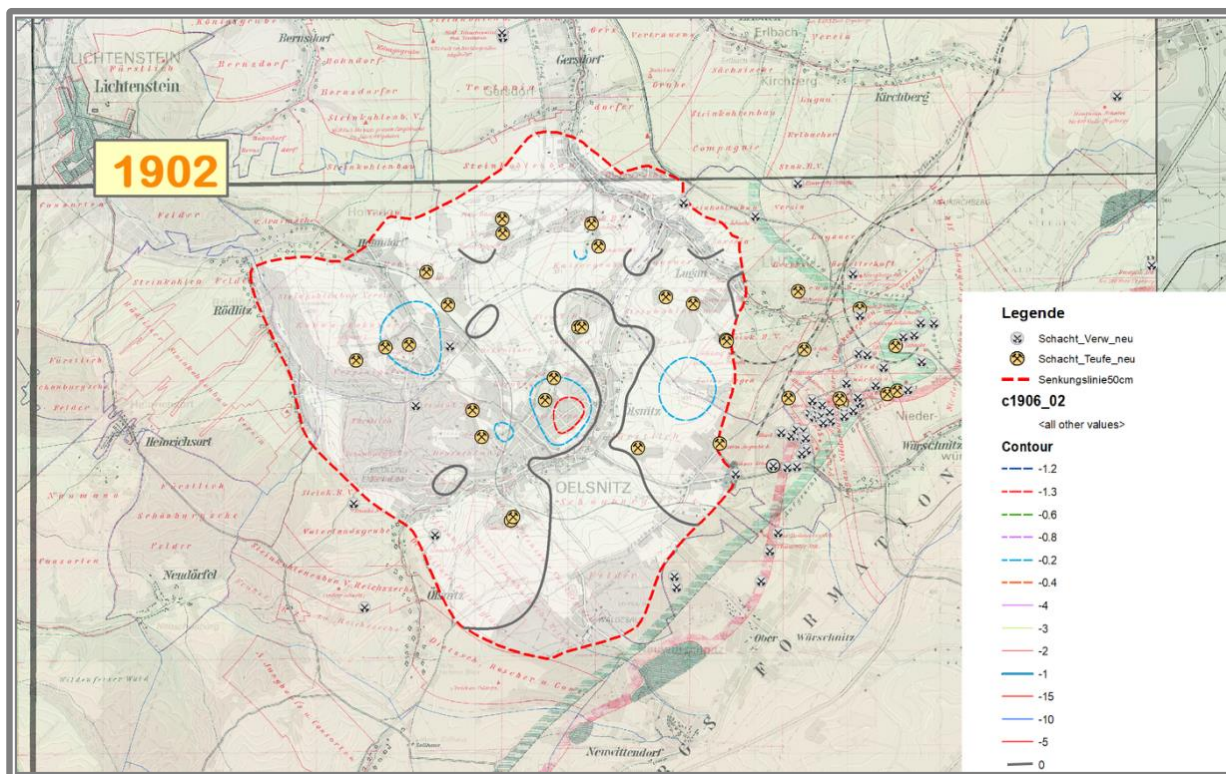


Abb.2 : Obr. 2 Souhrn poklesů a zdvihů v letech 1900 až 1902.

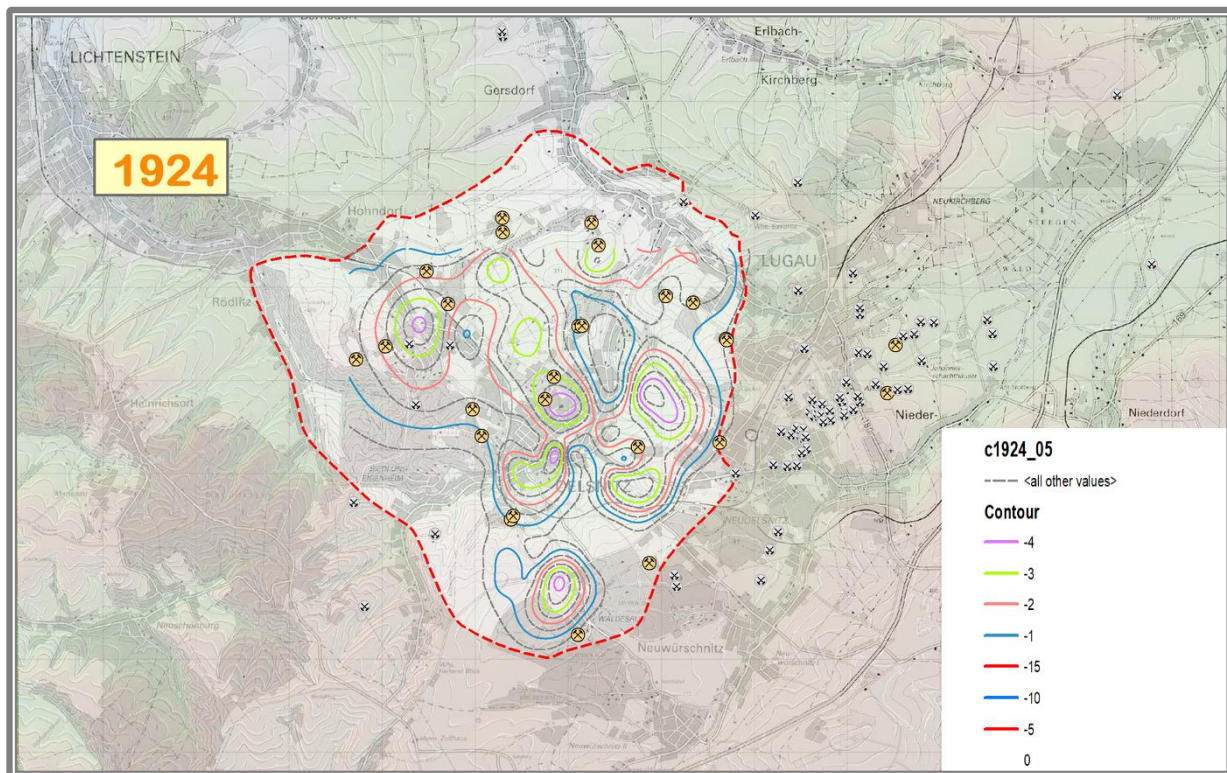


Abb.3 : Obr. 2 Souhrn poklesů a zdvihů v letech 1900 až 1924.

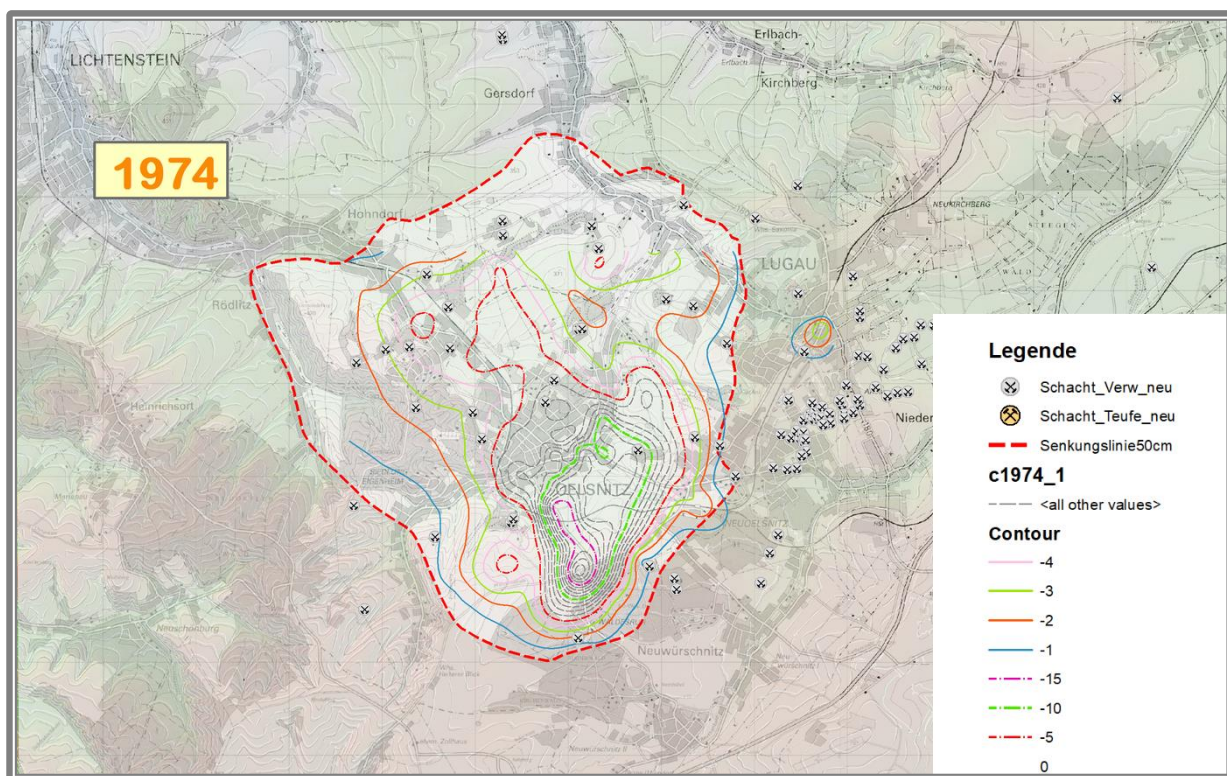


Abb.4 : Obr. 2 Souhrn poklesů a zdvihů v letech 1900 až 1974.

2 Modelování vertikálních pohybů terénu v letech 1974 až 2018

Po významných poklesech terénu (konečný pokles v oblasti "Waldesruh" cca 18 m) jsou od roku 1996/97 sledovány především zdvihy na povrchu terénu v důsledku nárůstu hladiny důlní vody. Specifikem revíru Oelsnitz/Lugau je přitom mimořádně pomalý nárůst hladiny důlních vod a z toho vyplývající velmi nízká míra zdvihů terénu (pouze cca 1 až 5 mm/rok). Z hlediska požadované přesnosti měření klade tato skutečnost extrémně vysoké nároky.

Sledování bylo prováděno v letech 1996/97 a 2002, 2006, 2014 a 2018 pomocí geometrického měření nivelizace na cca 50 dosud dostupných nivelizačních bodech bývalé revírní nivelizační sítě.

Aktuální úsilí směřuje k využití potenciálu Persistent Scatterer Interferometry (PSI) pro monitoring velmi nepatrných pohybů terénu. Pro tento účel je nutno vyvinout nové metodické přístupy jak na straně zpracování signálu (analýza časových řad), tak i na straně časového a prostorového modelování pohybů terénu. Na této bázi by se mohlo podařit lépe porozumět souvislostem těchto geokinematických procesů pro odvozování prognóz.

Vedle map absolutních příspěvků pro daný časový interval, publikovaných již v roce 2006, jsou formou izoliní zobrazovány střední míry pohybu v mm za rok.

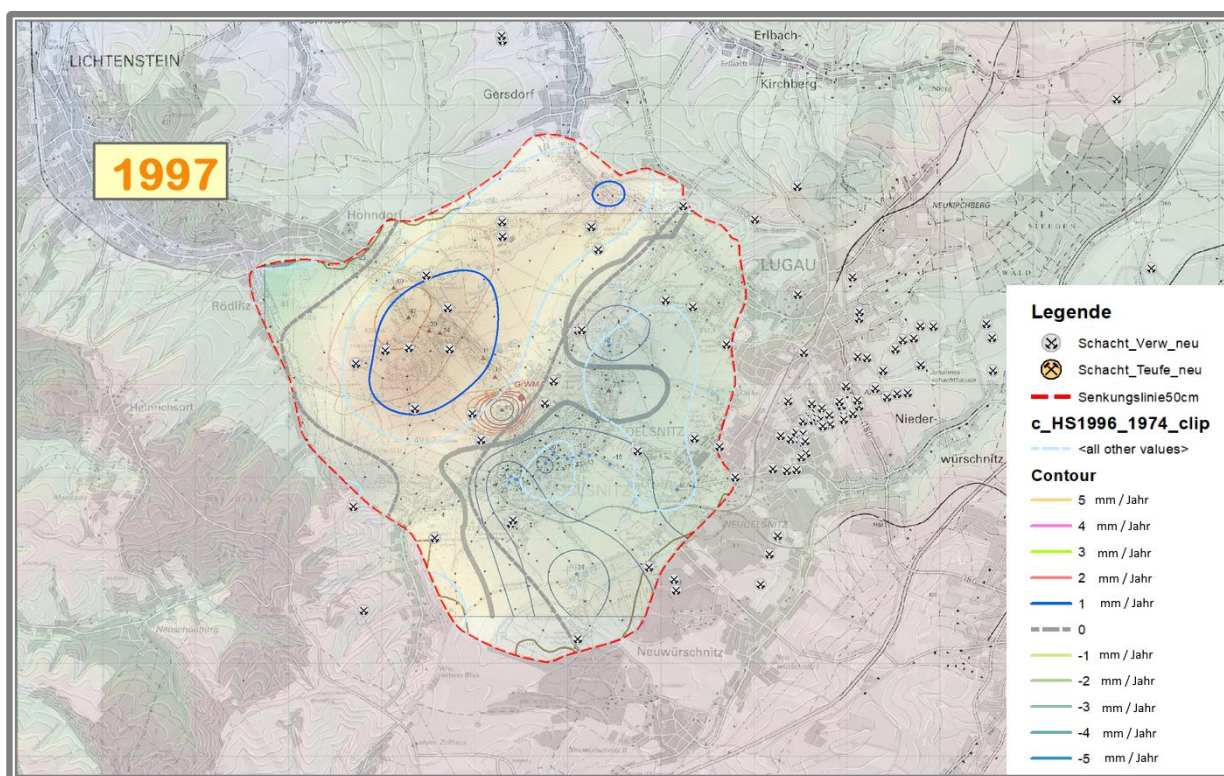


Abb.5 : Obr. 5: Zdvihy a poklesy terénu v letech 1974 až 1996/97

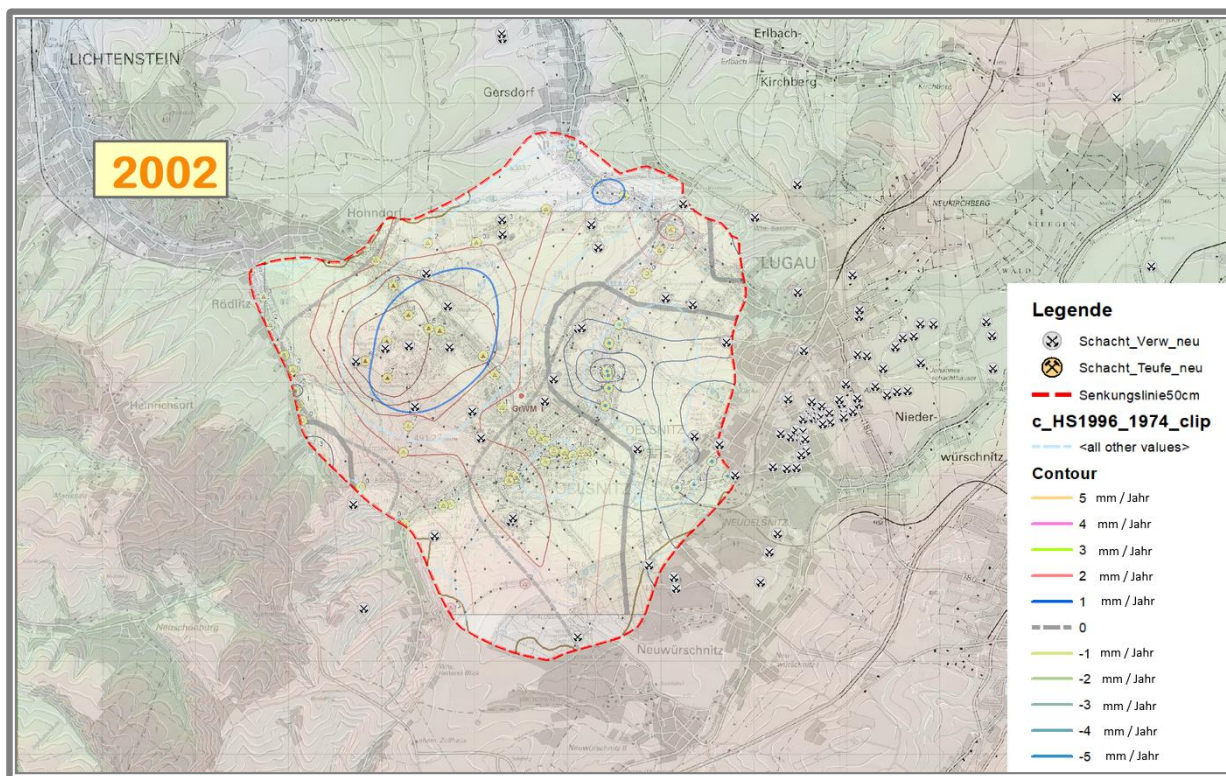


Abb.6 : Obr. 5: Zdvihy a poklesy terénu v letech 1996/97 až 2002

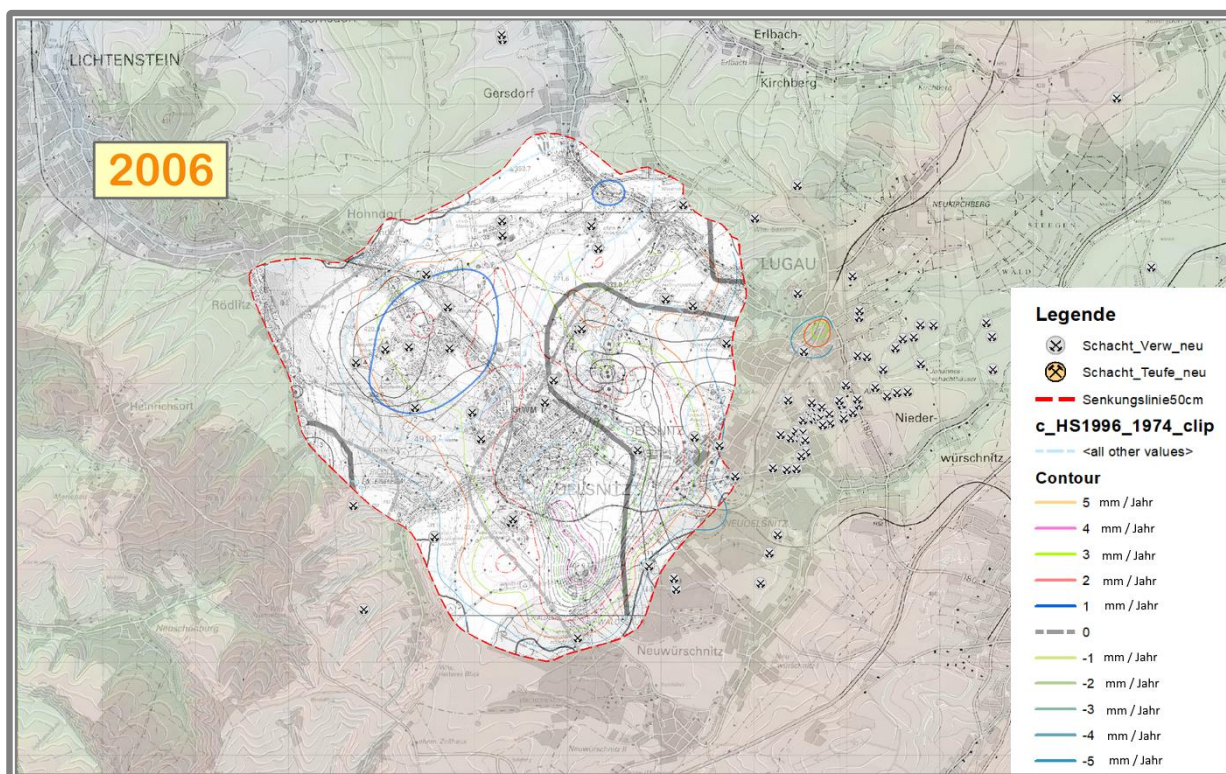


Abb.7 : Obr. 5: Zdvihy a poklesy terénu v letech 2002 až 2006

Na obr. 7 a dále jsou pro zobrazení strukturálních podobností vzorů terénních pohybů na pozadí zobrazeny izolinie konečných poklesů.

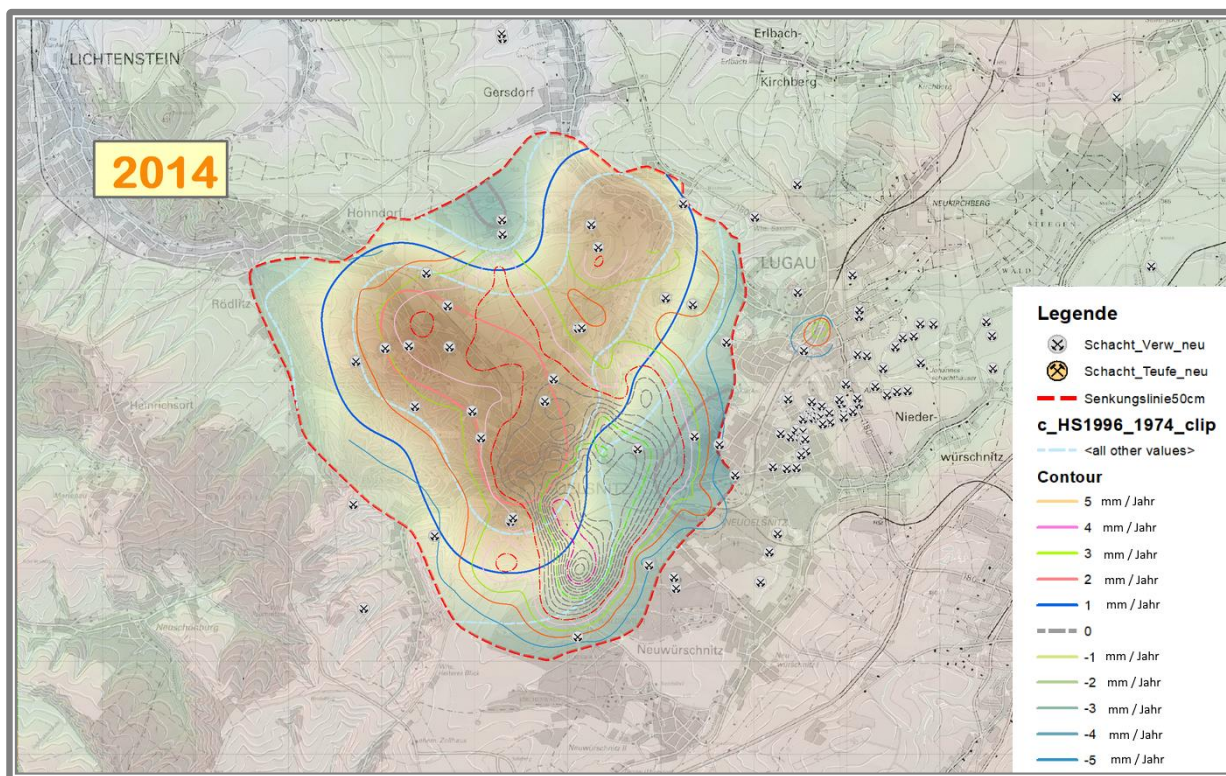


Abb.8 : Obr. 5: Zdvihy a poklesy terénu v letech 2006 až 2014

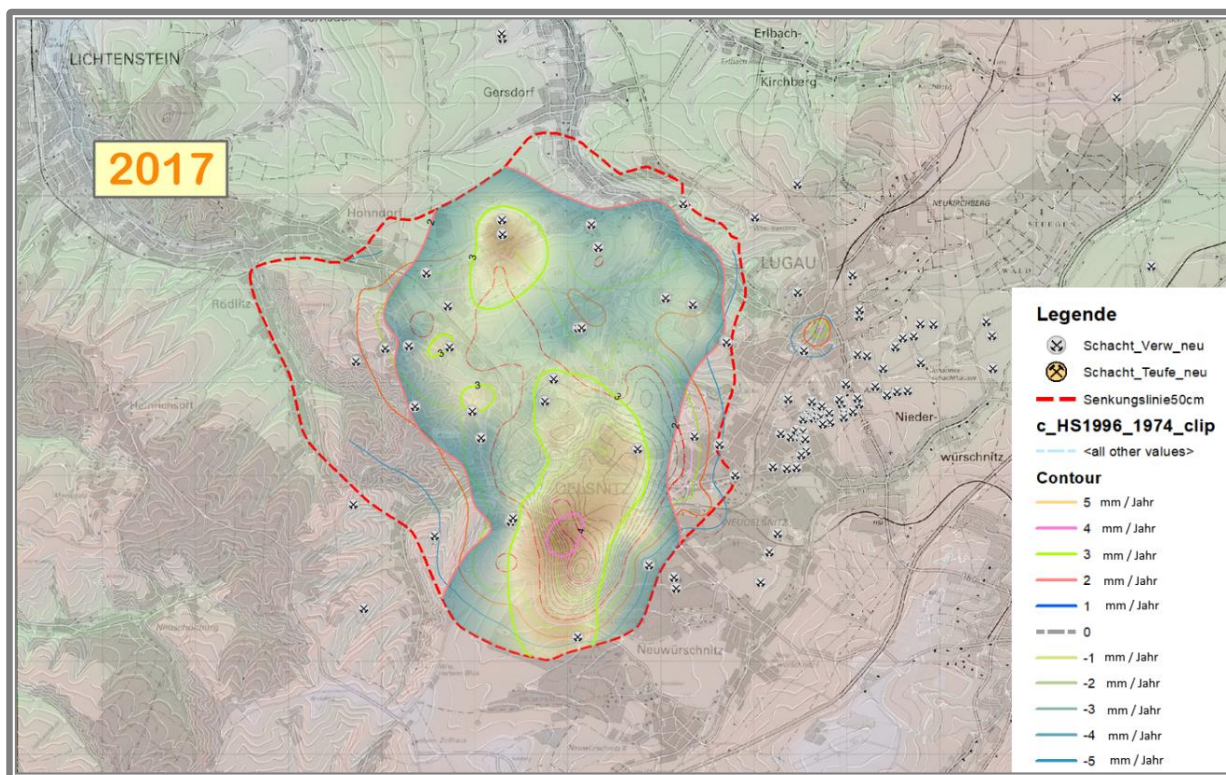


Abb.9 : Obr. 9: Zdvihy terénu v letech 2015 až 2017, odvozených z řad PSI

Vyhodnocení nejistot vertikálních pohybů terénu v důsledku nárůstu hladiny podzemních vod v bývalém hlubinném revíru Oelsnitz /E. detekovaných pomocí radarové interferometrie.

Dr.Ing. André John

Technická univerzita - Báňská akademie ve Freibergu - Ústav důlního měřičství a
geodézie

Stručné shrnutí:

Ústav důlního měřičství a geodézie Technické univerzity - Báňské akademie ve Freibergu se již od roku 1993 zabývá analýzou a monitoringem vertikálních pohybů terénu v bývalém revíru Oelsnitz/Erzgebirge. Aktuální úsilí směřuje k co nejlepšímu využití potenciálů radarové interferometrie pro detekci vertikálních pohybů terénu, aby bylo v budoucnosti možno v porovnání s měřením nivelizace ve velkých časových intervalech získat rovněž závěry k dynamice pohybů terénu v lepším časovém rozlišení.

Po představení průběhu analýzy PSI při využití volně dostupných softwarových řešení budou na příkladu revíru Oelsnitz analyzovány různé praktické otázky, vyplývající z aplikace tohoto postupu.

ABSTRACT:

The Institute for Mine Surveying and Geodesy of the TU Bergakademie Freiberg has been working for many years on the analysis and monitoring of vertical ground movements in the former coal mine area Oelsnitz/Erzgebirge. Recent efforts are aimed at making the best possible use of the potentials of radar interferometry for the detection of these vertical ground movements. In the future, for example, it would be possible to obtain temporally better-resolved statements on the dynamics of ground movements in comparison to levelling measurements at long time intervals.

After a general presentation of the workflow of a PSI analysis using widely free software



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



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014–2020



solutions, various practical questions resulting from the application of the method are analyzed using the example of the former mining area Oelsnitz/Erzgebirge.

1 Úvod

Aktivní fáze těžby v černouhelném revíru Oelsnitz/E trvala přibližně od roku 1850 do roku 1974, přičemž zatápění revíru bylo zahájeno na počátku sedmdesátých let 20. století a dosud probíhá. V roce 1976 byl důlním měřičem Curtem Bayerem předpovězen nárůst hladiny důlních vod zhruba do roku 2030. Po významných poklesech terénu během aktivní fáze těžby je možno aktuálně sledovat zdvihy povrchu terénu z důvodů nárůstu hladiny důlních vod. Specifikou revíru Oelsnitz jsou přitom nízká rychlost nárůstu hladiny důlní vody a z toho vyplývající nízká míra pohybů terénu.

Během aktivní fáze těžby byly poklesy terénu zaznamenávány pomocí měření nivelizace na cca 500 bodech ve dvouletém intervalu. Po ukončení těžby byla poté v letech 1996/97 a 2002, 2006 a 2014 prováděna měření nivelizace na cca 50 vybraných bodech bývalé revírní nivelizační sítě. Současné úsilí směřuje k vyčerpání potenciálů radarové interferometrie pro monitoring pohybů terénu.

2 Shrnutí

Nárůst hladiny důlních vod nebyl po uzavření dolů zpočátku vůbec sledován. Teprve v roce 2004 bylo započato s přestavbou stávajícího hlubinného vrtu na území města Oelsnitz na profil pro měření důlních vod (GRWM 1). V roce 2014 byl vybudován další profil pro měření důlních vod (GRWM 2) v obci Gersdorf na severu revíru. Kromě toho se na severovýchodě měřicího profilu (GRWM 2) nacházejí další tři profily pro měření podzemních vod (Bernsdorf, Lichtenstein, Mülsen), jejichž hladiny ukazují velmi podobné chování (vysoká korelace), což umožňuje jejich využití pro analýzu souvislosti ve výkyvech hladiny podzemních a důlních vod. Pro tyto účely byla s přihlédnutím k časovému posunu provedena analýza korelace středních výkyvů hladiny ve třech profilech, měřících hladinu podzemní vody a výkyvů hladiny důlní vody v měřícím profilu GRWM2. Ukazuje se, že tyto výkyvy v profilech pro měření hladiny podzemních vod korelují s určitým časovým posunem ve výši cca 2 - 3 měsíců s výkyvy hladiny důlních vod v profilu GRWM 2 ($p > 0.75$).

Pro technické sledování procesů zdvihu terénu v revíru Oelsnitz je v současné době analyzován potenciál radarové interferometrie. Tak zvaná radarová interferometrie, umožňující určit pohyby terénu ve směru senzoru, byla použita pro vyhodnocení radarových dat. Pro analýzu terénních pohybů po dobu delšího časového období lze použít vyhodnocení

pomocí metody "persistent scatterer interferometry" (metoda PSI) [1] [2]. V případě metody PSI jsou zohledňovány dlouhé časové řady scén, kdy je sledována časová změna fáze permanentních odražečů. Permanentními odražeči jsou body s pokaždé podobným zpětným odrazem, dominující jedné rozlišovací buňce (jednomu pixelu). Těmito tak zvanými "Persistent Scatterer"(PS) se stabilními vlastnostmi zpětného odrazu mohou být například stavební objekty, dopravní cesty, sloupy vedení elektrického napětí a podobné objekty.

Datovým základem pro aktuální vyhodnocení jsou radarová data (sestupná dráha) z programu Copernicus, družice Sentinel-1 a/b. Prostřednictvím portálu Copernicus Services Data Hub¹ Evropské vesmírné agentury (ESA) jsou tato data dostupná zdarma. Časový rozestup těchto dat činí zpravidla 12 dní pro období 01/2015-09/2016, případně 6 dní pro období po 09/2016. Vyšší hustota dat pro období od 09/2016 souvisí se zahájením operativního provozu druhé družice programu Copernicus Sentinel-1 (1B) v roce 2016.

Kromě softwaru STaMPS (Matlab) se pro zpracování radarových dat využívá volně dostupná aplikace Sentinel Application Platform (SNAP²) Evropské vesmírné agentury (ESA)

Pomocí aktuálních analýz vertikálních pohybů terénu v důsledku nárůstu hladiny důlních vod v bývalém revíru Oelsnitz/E., detekovaných pomocí radarové interferometrie, byly definovány otázky, které vyplynuly z první analýzy PSI (2015-2017) [5] v řešeném území. Celkem byly provedeny 4 nezávislé analýzy PSI, které se lišily pouze v analyzovaném období (2015-2017 vs. 2015-2018), případně ve zvoleném referenčním záznamu (Master 01.04.2017 vs. Master 21.06.2017).

Využitím nového přístupu (*snap2stamps*³ [6]) pro zpracování dat pomocí volně dostupného softwaru SNAP bylo nejprve možno výrazně snížit čas, potřebný pro výpočet. Nový přístup, kdy pro n -záznamů bylo vygenerováno n -dávek, sestávajících vždy z jednoho hlavního (master)-snímku a jednoho vedlejšího (slave) snímku, představuje oproti dosavadnímu postupu, tedy jedné dávky se všemi dostupnými daty, výrazný pokrok.

Pomocí analýzy rozdílně dlouhých období bylo možno sledovat, jak se se zvyšující délkou období sledování zvyšuje stabilita časových řad PSI. Porovnání analýz při využití různých master-snímku podtrhlo význam volby vhodného referenčního snímku. Ukázalo se, že

¹ ESA's Copernicus Services Data Hub portal - <https://cophub.copernicus.eu/dhus/>

² SNAP (Sentinel Application Platform) - <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

³ snap2stamps - <https://zenodo.org/record/1322353#.XKxdOKRCTmE>

master, který nebyl optimálně zvolen, ovlivňuje časové řady PSI negativně, které tak obsahují srovnatelně více rušivých vlivů a tím větší variabilitu. Využití nástroje pro "optimální" snímek na základě odhadované očekávané koherence, který je do SNAP implementován, se ukázalo být užitečné. Kromě toho by však mělo být pokaždé přihlédnuto i k dalším analýzám možných systematických vlivů master snímku.

Přesnost lokalizace množin bodů PSI je během procesu geokódování negativně ovlivňována různými faktory, což způsobuje problémy při interpretaci výsledků deformací a komplikuje porovnání bodů PSI z nezávislých analýz, případně bodů PSI s daty jiných senzorů. Zatímco relativní posuny ve směru pohledu (LOS) lze odhadnout s přesností na milimetry, pohybuje se přesnost umístění zpravidla v řádech decimetrů nebo i metrů. Radarová měření jsou ovlivňována různými komponenty, které ovlivňují odhad umístění, přičemž převládajícími faktory jsou atmosférické vlivy, zemské cykly, tektoniky a chyby v posunutí azimutu [7]. Tyto faktory mohou způsobit chyby v řádech centimetrů až metrů. Proto i výsledky nejrozličnějších analýz PSI nevykazují exaktně stejné umístění. Střední hodnota rozdílů ve zjištěné poloze bodů PSI v prostoru v různých analýzách PSI s variabilním referenčním snímkem činí 2 m, zatímco střední hodnota relativních rozdílů polohy bez atmosférických vlivů činí pouze 0,38 m. To potvrzuje závěry [7] k velikosti chyb, vyskytujících se z důvodů atmosférických vlivů.

Časové řady PSI relativních pohybů terénu se skládají z trendu a stochastických výkyvů. Poslední uvedené vznikají autoregresivními procesy (výkyvy signálu, jejichž příčiny jsou zprvu neznámé), systematickými (a hrubými) chybami měření (například v důsledku atmosférických poruch nebo chyb při navazování obrazové fáze (phase- unwrapping) a šumu [4]. Komponenta trendu je v rámci analýzy PSI pomocí softwaru STaMPS nejprve určena lineární regresí. Z takto zjištěného trendu pohybu je pak odvozena rychlost pohybu [mm/arok. Předpoklad lineární charakteristiky pohybu je pro velkou část bodů v řešeném území (revír Oelsnitz) správný, pro procesy pohybu terénu však může být charakteristický i nelineární pohyb. V těchto případech je patrné, že předpoklad lineárního pohybu nezobrazí dynamiku pohybu terénu realisticky. Pro modelování pohybů terénu v čase a prostoru by proto v těchto případech měly být využity deterministické modely trendů vyššího řádu nebo případně i statistické přístupy Moving-Window. Snaha o odvození ročních trendů pohybů ukázala, že příliš krátká monitorovací období mohou vést k nereálným výsledkům. Je tedy nutný další výzkum k odvozování relevantních trendů pohybů z rozmanitých ovlivněných časových řad PSI.

Pohyby terénu jsou časově proměnně trojrozměrné deformace povrchu země. Pomocí radarové interferometrie však mohou být určovány pouze pohyby ve směru pohledu senzoru (Line of Sight - LOS). Aby bylo možno získat trojrozměrné pohyby terénu, je nutno mít k dispozici tři radarové datové sady, zaznamenané v různých směrech, které se prostorově a časově překrývají [3]. Jelikož ale všechny dostupné radarové senzory obsahují přibližně pouze severo-jihní (vzestupný/ascending), případně jiho-severní (sestupný/descending) směr letu, probíhají směry pohledu (pohled vpravo ss cca 90° ke směru letu/ azimutu) buď ze západu na východ (vzestupně/ascending) nebo z východu na západ (sestupně/descending). Důsledkem toho je, že prostřednictvím aktuálně dostupných radarových dat (například Sentinel-1) je možno odvodit změny výšek a pohyby ve směru východ-západ. Zatímco horizontální komponenty pohybu ve směru východ-západ je možno určovat pouze kombinací vyhodnocení radarových dat vzestupné a sestupné dráhy, lze změny výšek za předpokladu, že nedošlo k výskytu horizontálních posunů, určit pouze z pohybu ve směru pohledu (Line of Sight - LOS) dráhy. V oblastech s výskytem horizontálních pohybů však zde může dojít k chybné interpretaci výškových změn [4]. Z tohoto důvodu je nutno zásadně upřednostnit vyhodnocení vzestupné a sestupné dráhy a následné kombinace výsledků. I námi bylo toto zohledněno jako další logický krok budoucích aktivit v řešeném území.

Do budoucna představuje kromě toho i zajímavou oblast komplex témat modelování pohybů terénu v prostoru a čase na základě dat, získaných radarovou interferometrií, která vyžaduje další výzkum.

SEZNAM LITERATURY

- [1] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca. Permanent scatterers in sar interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1):8–20, Jan 2001.
- [2] C. Werner, U. Wegmuller, T. Strozzi, and A. Wiesmann. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477), volume 7, pages 4362–4364 vol.7, July 2003.
- [3] Yin, X.; Busch, W.: Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekonfigurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. In: Busch, W. (Hrsg.): Tagungsband Geomonitoring 2018, 1. bis 2. März 2018 in Clausthal- Zellerfeld, S. 119 – 138

- [4] Busch, W.; Walter, D.; Coldewey, W.G.; Hejmanowski, R.: Bergwerk Lohberg/Osterfeld der RAG AG. Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches. Gutachten im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg. Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, Mai 2017, Clausthal-Zellerfeld
- [5] A. John, K.-H. Löbel, 2018: Copernicus-Satellitendaten für das Monitoring von vertikalen Bodenbewegungen durch Grubenwasseranstieg im ehemaligen Steinkohlerevier Oelsnitz/Erzgebirge 18. Altbergbaukolloquium, Wieliczka 2018; Tagungsband - Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 101-119, ISBN 978-3-938390-22-1
- [6] M. Fomelis, J. M. Delgado Blasco, Y-L. Desnos, M. Engdahl, D. Fernandez, L. Veci, J. Lu and C. Wong. "ESA SNAP - StaMPS Integrated processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2018.
- [7] Dheenathayalan, P., Small, D., Schubert, A. et al.; High-precision positioning of radar scatterers, Journal of Geodesy (2016) Vol. 90 Issue 5: p. 403-422
<https://doi.org/10.1007/s00190-015-0883-4>

Představení projektu GeoMAP: Modelovací, vizualizační a prognostické nástroje pro zobrazování důsledků těžby a potenciálů nového využití

Sylvi Hädecke, Dr. Christin Jahnsová

Saský zemský úřad pro životní prostředí, geologii a zemědělství, oddělení 10
Geologie, referát 105

Co je GeoMAP?

Projekt GeoMAP slouží k výměně informací o geovědních metodách a modelování jako zásadním podkladu pro komplexní řešení v těžebních oblastech a v oblastech, ve kterých byla těžba zastavena. Bez kvalifikovaného datového základu a vyhodnocování není možno formulovat spolehlivé závěry a tím i prognózy například k zatápění dolů a nárůstu hladiny podzemní vody, ke zdvihům a poklesům terénu, svahovým sesuvům a různým procesům transportu látek, ale i využívání důlních vod.

Jak v Česku, tak i v Sasku byly v uplynulých desetiletích v těchto oblastech získány rozsáhlé zkušenosti s různými programy na sběr dat, modelování či vizualizaci. Pokaždé se jasně ukázalo, že spolehlivé prognózy lze formulovat pouze na základě reprezentativních datových sad a jejich vysoce kvalifikovaném vyhodnocení. Rovněž tak bylo jasné, že výpovědní přesnost nejrůznějších metod a programů pro modelování závisí na celé řadě okrajových a místních podmínek, které se mohou v závislosti na dané lokalitě lišit.

V rámci projektu mají být vzájemně představeny a diskutovány zkušenosti partnerů projektu z oblasti sběru, modelování a vizualizace geovědních dat v různých modelových hornických regionech. Cílem partnerů projektu je, zlepšit prostřednictvím nových impulsů získávání a vyhodnocování datových sad a tím i prognózy různých jevů v oblastech, ve kterých byla ukončena důlní činnost, .

Kde partneři projektu GeoMAP působí?



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



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014–2020



V rámci projektu GeoMAP jsou řešeny následující modelové regiony:

- černouhelný revír Lugau/Oelsnitz: tento modelový region je řešen hlavním příjemcem projektu, kterým je Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii (LfULG), a partnerem projektu, Geotechnickým ústavem Technické univerzity - Báňské akademie ve Freibergu.
- hnědouhelný revír Most v severních Čechách: tento modelový region je řešen partnerem Projektu Technickou univerzitou v Ostravě.
- hornické revíry v Krušných horách s výskytem důlních vod: tento přesahující modelový region je řešen partnerem projektu, Ústavem termodynamiky Technické univerzity - Báňské akademii ve Freibergu.

Získané poznatky jsou však aplikovatelné i v jiných hornických reginech.

GeoMAP v bývalém saském černouhelném revíru Lugau/Oelsnitz

Černouhelný revír Lugau/Oelsnitz v okrese Erzgebirgskreis v Sasku, který je v současné době zatápěn, je již několik let oblastí, ve které probíhá řada komplexních geologických, hydrogeologických a hornických výzkumů. Ve vztahu na neustálý nárůst hladiny důlních vod zde existuje naléhavá potřeba řešení řady otázek. Z tohoto důvodu se tento příspěvek zabývá specifickými montáň-hydrogeologickými podmínkami tohoto revíru a dosavadním úsilím o vytvoření prognózy zatápění revíru. Dále bude v příspěvku poskytnut náhled do aktuálního stavu řešení projektu GeoMAP, podpořeného z EU, se zaměřením na výzvy v oblasti trojrozměrného modelování a vizualizace důsledky těžební činnosti.

Projekt GeoMAP navazuje na předcházející výzkumy. V rámci tohoto projektu má být provedena aktualizace a upřesnění stávajícího trojrozměrného modelu té části regionu, která byla ovlivněna důlní činností. Přitom mají být zohledněna rovněž nová data, jako například naměřené geofyzikální hodnoty, jejichž získání bylo zadáno a realizováno městem Oelsnitz/Erzgebirge v rámci projektu Vita-Min, podpořeného EU. Kromě toho bude provedena rozsáhlá rešerše saských archivních fondů pro doplnění dat (například staré důlní mapy). Tyto práce představují podstatný základ pro upřesnění modelu a pro popis velmi komplexních podmínek v podloží.

Pokračující detailní práce v řešeném území Lugau/Oelsnitz a odborná komunikace a výměna s ostatními montáňskými regiony jsou předpokladem pro lepší prognózu a řešení důsledků těžební činnosti. To platí především z hlediska budoucího zamezení rizikům a udržitelného využívání oblastí, ve kterých byla ukončena hornická činnost.

Relativně malý revír je charakterizován velkými hloubkami těžby, komplexními tektonickými poruchami a četnými hydraulicky působícími jednotkami a strukturami. Tyto předpoklady svého času komplikovaly důlní činnost a mají dodnes vliv na monitoring a prognózu jevů, které jsou důsledky těžební činnosti. Již před zastavením těžby v roce 1971 došlo k deformacím povrchu terénu, které byly vyvolány hornickou činností. Tyto deformace se na povrchu projevovaly především trhlinami a až 17 m hlubokými poklesovými kotlinami a vznikem poldrů [Felix et al 2007]. Dominující poklesové jevy odezněly po roce 1971 jen velmi pozvolna. Jak ukázalo měření nivelizace revíru, došlo poté v důsledku zastavení čerpání důlních vod a nárůstu vodní hladiny v důlních dílech k lehkému vyzdvižení povrchu terénu. Zatápění revíru není dodnes ukončeno. To znamená, že hladina vody v jednotkách, ze kterých byla předtím voda odčerpávána, v nichž lze předpokládat výskyt zhruba 47 Mio. m³ zbytkového vyrubaného prostoru, dosud stále stoupá [Felix et al 2010].

V rámci tehdejšího zajištění důlních děl, realizovaného do roku 1974, nebyla předpokládána žádná zařízení pro monitoring nárůstu hladiny důlních vod. Průběh zatápění tak nebylo možno po dlouhou dobu ani monitorovat, ani ovlivnit. V roce 2003 tak Svobodný stát Sasko zřídil za účelem sledování zatápění, první profil pro měření hladiny důlních vod. Během následujících let přispěly projekty, podpořené EU, jako VODAMIN, Vita-Min a aktuálně GeoMAP, k rozvoji stavu znalostí v oblasti důsledků hornické činnosti v revíru Lugau/Oelsnitzer a současně k vybudování výměny poznatků s ostatními regiony v Německu a sousedním Česku, které byly rovněž postiženy důlní činností.

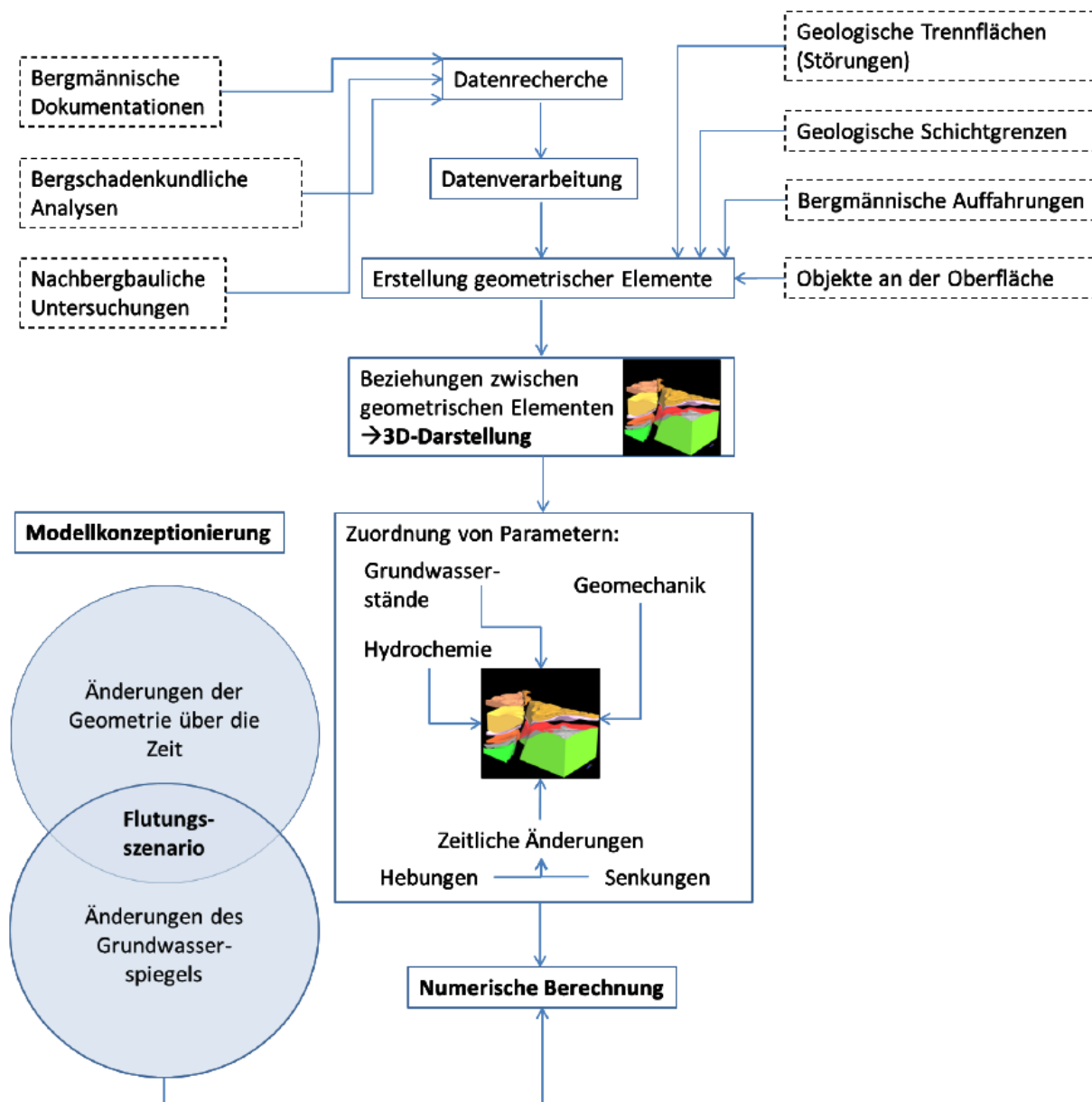
Geologicko hornický trojrozměrný model pro Lugau/Oelsnitz

Geologicko hornický model představuje geometrický základ pro geomechanické a hydrogeologické výpočty, do kterého je možno vložit všechna ostatní další data a získat tak nové informace. Komplikovaná geologická stavba řešeného území však vyžaduje extrémně vysokou hustotu dat, která v současné době ještě není zajištěna. Ukázalo se, že současný 3D model splňuje podmínky pro předpověď zatápění pouze zčásti, především proto, že má k dispozici nedostačující data ke geologické stavbě podloží a dosud není možno v úplnosti zachytit přesné propustnosti a objemy ražeb.

Bergmännische Dokumentationen	Důlní dokumentace
Bergschadenkundliche Analysen	Analýza důlních škod
Nachbergbauliche Untersuchungen	Průzkumy po ukončení důlní činnosti
Modellkonzeptionierung	Koncepce modelu

Änderungen der Geometrie über die Zeit	Změny geometrie v průběhu času
Flutungsszenario	Scénář zatápění
Änderungen des Grundwasserspiegels	Změny hladiny podzemní vody
Datenrecherche	Rešerše dat
Datenbearbeitung	Zpracování dat
Erstellung geometrischer Elemente	Vytvoření geometrických prvků
Beziehungen zwischen geometrischen Elementen 3D Darstellung	Vztahy mezi geometrickými prvky - 3D zobrazení
Zuordnung von Parametern	Přiřazení parametrů
Grundwasserstände	Stavy podzemní vody
Geomechanik	Geomechanika
Hydrochemie	Hydrochemie
Zeitliche Änderungen	Časové změny
Hebungen	Zdvihy
Senkungen	Poklesy
Numerische Berechnung	Numerické výpočty
Geologische Trennflächen (Störungen)	Geologické rozhraní (poruchy)
Geologische Schichtgrenzen	Hranice geologických vrstev
Bergmännische Auffahrungen	Hornické ražby
Objekte an der Oberfläche	Objekty na povrchu





Obr.: Workflow geologického, hydrogeologického a geomechanického modelování, vizualizace a prognózy pro revír Lugau/Oelsnitz.

Cílem projektu GeoMAP je tedy využít rozsáhlé archivní fondy z doby aktivní důlní činnosti, digitalizovat významné hornické mapové poklady a jejich georeferencování za účelem doplnění současného modelu nebo zkonstruování modelu nového. V rámci projektu GeoMAP probíhají současně na Geotechnickém ústavu Technické univerzity - Báňské akademie ve Freibergu práce na vytvoření koncepce modelu pro numerický výpočet zdvihů a poklesů terénu v revíru Lugau/Oelsnitz. Cílem obou přístupů je vytvoření základů pro modelování nárůstu hladiny důlních vod v revíru Lugau/Oelsnitz- Pro cílené řešení tohoto úkolu je nutná rovněž odborná diskuse s odborníky z jiných hornických revírů.

Literatura

- [Felix et. al 2007] Felix, M., Berger, H.-J.; Schubert, H.; Görne, S. u. a. (2007): Bergbaufolgen im ehemaligen Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz unter besonderer Berücksichtigung des Grubenwasseranstiegs. - Unveröff., Sächs. Landesamt für Umwelt und Geologie; Freiberg.
- [Felix & Berger 2010] Felix, M., Berger, H.-J. (2010): Steinkohlebergbau und Bergbaufolgen im Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz. – Beitrag in Geoprofil Bd. 13, Sächs. Landesamt für Umwelt und Geologie; Freiberg.



Modelování tras proudění podzemní vody a jejího zdržení - relevance pro oblasti stařin

Dr. Tamara Kolbe, Prof Traugott Scheytt

Technická univerzita - Báňská akademie Freiberg - Geologický ústav, katedra
hydrogeologie a hydrochemie

Základem pro druh a rozsah hydrogeologických změn v oblasti stařin je geologická stavba s různými stratigrafickými jednotkami. V důsledku vyražení prostor dochází k masivním změnám původní hydraulické vodivosti hornin, které mohou vést k poruchám hydraulické a / nebo hydrochemické rovnováhy. Hydraulické a hydrochemické změny mohou přitom ovlivnit kromě podzemních vod i vody povrchové. Pro kvantifikaci látkové obměny v podzemní vodě a emise látek mezi jednotlivými jednotkami je používána řada metod. Mezi tyto metody patří mimo jiné stopovací metody a numerické modely proudění.

Stopovače pro označování podzemní vody jsou používány při řešení řady otázek v oblasti popisu komplexních hydrogeologických podmínek a pro zjišťování stáří podzemních vod. Pod pojmem stáří podzemní vody je chápána střední doba zdržení smíšeného vzorku, který se skládá z vod s rozdílnou dobou zdržení. Vzorky podzemní vody z profilů pro měření hladiny podzemní vody jsou smíšenými vzorky v případě, že jsou odebírány z celé délky určitého filtračního zařízení. Za pomoci modelů lze kalibrovat distribuci doby zdržení nebo stochastickou distribuci naměřených smíšených koncentrací s podzemní vodou. Smíšené vzorky tak při použití modelování doby zdržení poskytují nejen informace o středních koncentracích, ale mohou prostřednictvím stochastické distribuce koncentrací poskytnout zajímavé informace o hydrodynamických a hydrochemických procesech v podloží.

V této přednášce bychom pomocí příkladů studie chtěli ukázat, jaké informace tyto smíšené vzorky obsahují a jaké informace lze získat z bodových měření o imisích a prostorově variabilním odbourávání nitrátu v kolektoru podzemní vody. Pro určování cest proudění a doby zdržení podzemní vody používáme kombinaci značkovačů a modelů proudění podzemní vody. Na základě těchto výsledků pak sledujeme reakční procesy podél cest proudění a jaké ekvivalenty lze použít pro formulování závěrů o prostorové variabilitě procesů odbourávání. Ve zmiňované případové studii je sledován transport a odbourávání nitrátů v povodí, které je zemědělsky využíváno; představené metody a koncepce budou do budoucna aplikovány i na otázky v souvislosti s historickou těžbou.

Popisované zemědělsky využívané povodí vykazuje místy zvýšené koncentrace nitrátů (až 80 mg/l, měřeno na 16 profilech) v podzemní vodě. Diskutabilní byla na počátku studie

příčina prostorově rozdílných signálů. Příčinami mohou být rozdílná množství imisí v průběhu času, proudění podzemní vody nebo denitrifikační procesy (denitrifikace označuje mikrobiologické odbourávání dusíku, obsaženého v nitrátu, na molekulární dusík v anoxickém prostředí) uvnitř oblasti jímání daného vrtu.

Pro určení stáří podzemní vody a pro kalibraci modelu proudění podzemní vody byly jako značkovací použity chlor-fluorované uhlovodíky. Tím bylo možno vizualizovat pohyb virtuálních částic v proudovém poli a sledovat procesy podél linií drah. Z výsledků vyplynulo, že střední doby zdržení podzemní vody činí 40 let a střední cesta proudění 350 m (1). Reaktivní značkovací (NO_3^- , O_2 , N_2 excess) byly využity pro sledování denitrifikačních procesů podle linií drah. Mohli jsme tak ukázat, že jen odhad distribuce doby zdržení a měření kyslíku a nitrátů postačí pro formulování závěrů o územně variabilním šíření denitrifikačních procesů. Parametry, které byly v rámci programu monitoringu zaznamenávány, mohly být dále interpretovány tak, aby bylo možno odhadnout potenciál odbourávání celého zvodnělého horizontu a vliv povrchových vod ze zemědělsky využívaného infiltračního území (2).

Reference:

1. Kolbe, T., Marçais, J., Thomas, Z., Abbott, B. W., de Dreuz, J.-R., Rousseau-Guetin, P., Aquilina, L., Labasque, T., Pinay, G., (2016), Coupling 3D groundwater modeling with CFC-based age dating to classify local groundwater circulation in an unconfined crystalline aquifer. *Journal of Hydrology* .
2. Kolbe, T., de Dreuz, J.-R., Abbott, W. B., Aquilina, L., Babey, T., Green, C.T., Fleckenstein, J., Labasque, T., Laverman, A., Marçais, J., Peiffer, S., Thomas, Z., Pinay, G., (2019), Stratification of reactivity determines nitrate removal in groundwater. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*.



Prognóza mineralizace důlních vod při zatápění bývalého dolu Ost společnosti RAG

Marcel Schlegel, Dr René Kahnt

Společnost G.E.O.S Ingenieurgesellschaft mbh s r.o.

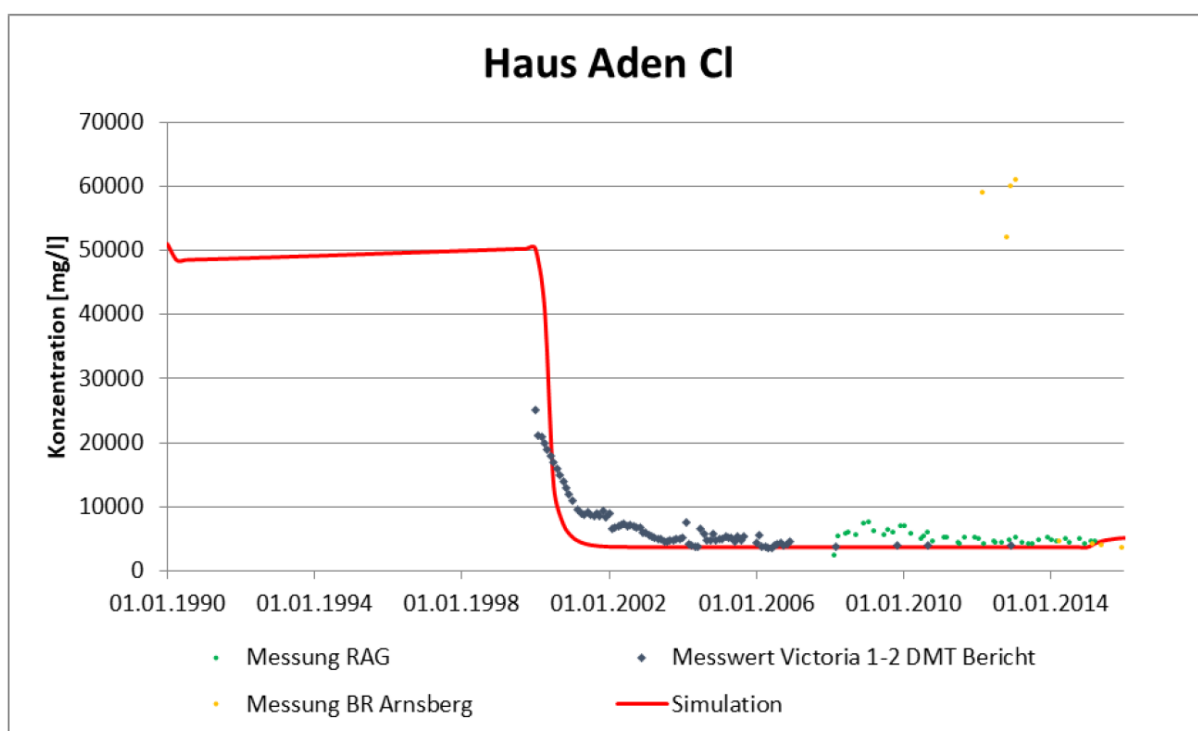
V roce 2014 předložila společnost Ruhrkohle AG a.s.(RAG), návrh koncepce čerpání důlních vod, řešící dlouhodobou optimalizaci čerpání důlních vod pro Severní Porýní - Vestfálsko. Podle této koncepce by voda z dolu Ost byla nadále odváděna do vodního toku Lippe. V této souvislosti bylo nutno vyhodnotit látky, transportované důlní vodou, ve vztahu k vodnímu toku Lippe. Bylo především nutno určit, zda v rámci nárůstu hladiny důlních vod lze očekávat výraznou redukci látkové zátěže důlních vod tak, jak bylo dokumentováno v Cášském černouhelném revíru (Aachener Steinkohlenrevier). Z pověření akciové společnosti RAG byla Deutsche Montan Technik GmbH spol. s r.o. v červnu 2015 zpracována příslušná prognóza průběhu zatápění a kvality vody ("Prognose zu Einleitwerten am Standort Haus Aden bei Flutung der Wasserprovinz Ost" (Prognóza hodnot vody v lokalitě Haus Aden při zatápění vodní provincie Ost)). Firma G.E.O.S Ingenieurgesellschaft mbH spol. s r.o. se subdodavatelem Dr. Unlanden (HydroGeo-Consulting) byla vypracováním tohoto znaleckého posudku pověřena na základě výsledku veřejného výběrového řízení zemským Ministerstvem pro ochranu klimatu, životního prostředí, zemědělství, přírodu a ochranu spotřebitelů Severního Porýní - Vestfálska.

Řešení probíhalo celkem tři měsíce a zaměřilo se na následující tři hlavní body::

- rešerše a detailní vyhodnocení dat a zpracování internetové databáze,
- sestavení modelu zatápění dolů za účelem formulování prognózy stavu zatápění a mineralizace s přihlédnutím ke geochemickým interakcím,
- kontrolní výpočet historie zatápění,

- formulování deterministických a probabilistických prognóz pro další průběh zatápění a ověření jistoty závěrů posudků, zpracovaných z pověření společnosti RAG,
- ověření dopadů budoucích technických rámcových podmínek,
- porovnání situace v oblasti důlních vod v ostatních černouhelných revírech s bývalým dolem Ost.

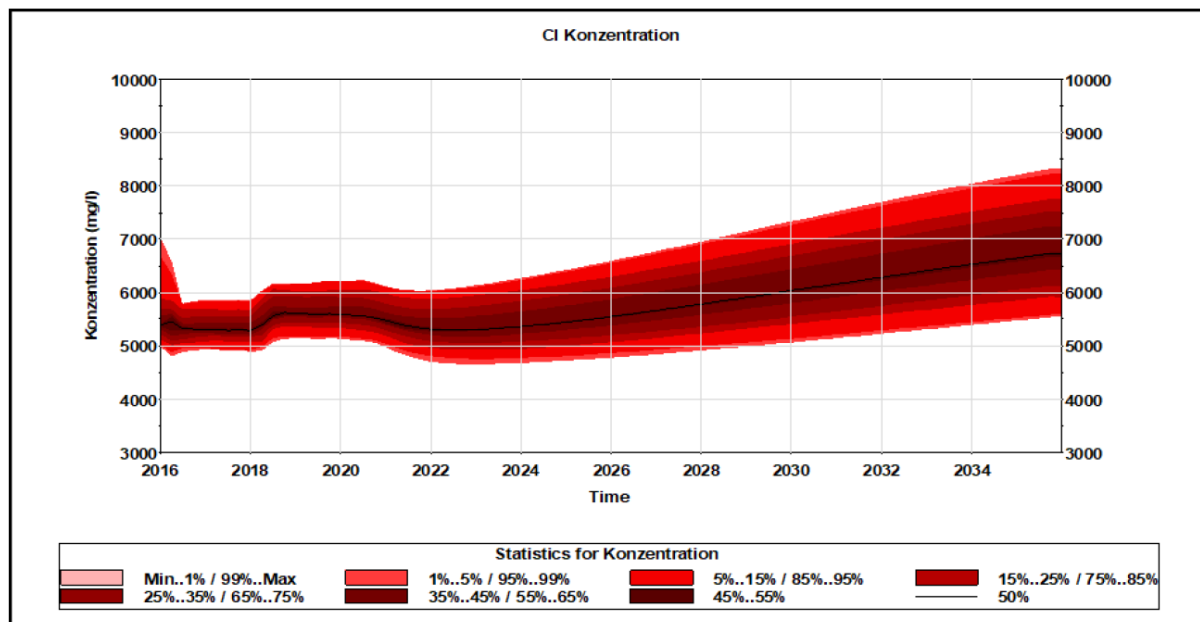
Dodatečně byly prověřovány scénáře pro další průběh zatápění. Jako příklad je dále uváděno časové porovnání pro koncentrace chloridů za provincii Haus Aden.



Obr. 1: History Matching / kalibrace modelu: časový vývoj koncentrací Cl pro provincii Haus Aden

Konzentration	Koncentrace
Messung	Měření
Simulation	Simulace
Messwert	Naměřená hodnota

Bericht	Zpráva
---------	--------



Obr. 2: Prognóza vývoje koncentrací CL v lokalitě Haus Aden s přihlédnutím k nejistotám.

Na základě řešení těchto úkolů byla prognóza, předložená DMT, potvrzena. Navíc byly ilustrovány nejistoty a šíře problému. Na základě dalších scénářů byla formulována doporučení pro optimalizaci zatápění.

Numerické přístupy k diskretizaci a hydraulické simulaci při zatápění hlubinných dolů

*Dr. Timo Kessler¹, Dr Michael Eckart², Prof. Dr. Maria-Theresia
Schafmeister¹*

¹Univerzita v Greifswaldu, Ústav geografie a geologie,

²DMT GmbH spol. s r.o. & Co. KG, k.s.,

Klíčová slova: *zatápění dolů, černé uhlí, nárůst hladiny důlní vody, numerické modelování*

1. Úvod

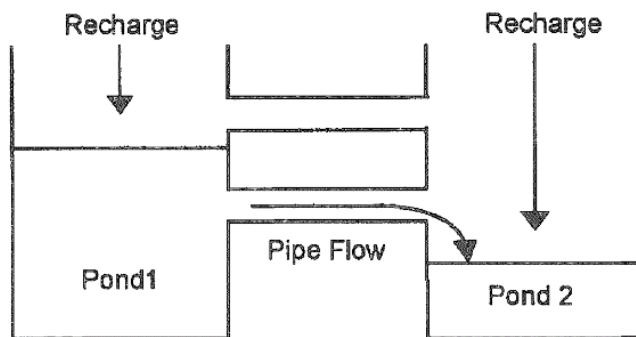
V prosinci 2018 byla zastavena těžba v posledním německém aktivním černouhleném dole Prosper Haniel. Současně s ukončením těžby uhlí začínají úkoly následného zajištění a v případě řady dolů i jejich zatopení a čerpání vody. Při zatápění dolu dojde v první řadě k vypnutí čerpadel v patrech dolu. Hladina podzemní vody pak díky přítokům postupně stoupá až na určitou úroveň. Přítok vody se skládá z infiltrace z meteorických srážek, přítoků v hloubce z rozpukaných vodonosných vrstev a z vody v pórech a puklinách hornin. Kvantitativní rozdělení těchto komponent závisí na struktuře a hydraulických vlastnostech překryvných vrstev a proudění podzemní vody v hloubce. Během zatápění dochází často k míšení hlubinných vod s vysokým obsahem solí s přípovrchovými vodami (turbulentní proudění v dutinách, čerpání důlních vod). To může způsobit znečištění sekundárních vodonosných vrstev a vysoké koncentraci solí v čerpané vodě. Cílem čerpání důlních vod je v tomto ohledu identifikace a nastavení udržitelné hladiny důlních vod, při které jsou zajištěny relevantní zdroje vody a minimalizovány kontaminace.

Pro předpovídání časového průběhu nárůstu hladiny podzemní vody a s tím spojené chemické zátěže byly vytvořeny a dokumentovány různé modely zatápění dolů (viz. Toran and Bradbury, 1988; Adams and Younger, 1997; Sherwood, 1997; Burke and Younger, 2000; Gandy and Younger, 2007; Azrag, Ugorets and Atkinson, 2012). Na rozdíl od obvyklých modelů proudění v porézních médiích podle Darcyho, je pohyb vody ve

vyrubaných prostorech minimálně během nárůstu hladiny vody označován za turbulentní. Zatápění dolů tedy většinou představuje kombinaci propustnosti puklinové, průlinové a propustnost podle dutin. Podle charakteristiky proudění lze modely rozdělit do tří skupin: a) fyzikálně motivované koncepce modelů, které proudění mezi dutinami a maticí počítají diferencovaně, b) semi-explicitní parametrické modely (krabicové modely), bilancující toky prostřednictvím definovaných objemů a c) plně diskretizované, numerické kontinuální modely. Dvě z těchto koncepcí [b) a c)] budou představeny v tomto příspěvku.

Semi-explicitní parametrizované modely

Během devadesátých let 20. století byly pro velké hornické revíry s několika vodními provinciemi vyvinuty koncepční modely vzájemně komunikujících nádrží s jednotnou parametrizací a realizovány v softwarových balíčcích (GRAM, BoxModell3D). Hydraulické jednotky jsou zde definovány nezávisle na prostorové geometrii důlního díla. Díky tomu dochází k výraznému snížení náročnosti výpočtu. Tento přístup je srovnatelný s objemovým modelem černé skříňky, pomocí kterého jsou určovány přechodové a výtokové body pro každou nádrž samostatně. Výpočet nárůstu hladiny podzemní vody vychází ze zatopeného objemu nádrže a vodní bilance, vypočtené pro danou vodní provincii (Adams and Younger 2001). Jelikož se v případě parametrizovaných modelů jedná o modelování bilance objemu, je klíčovým výpočet zaplavitelného objemu vyrubaných prostor, který je definován jako objem zbytkového vyrubaného prostoru jako rozdíl hrubého objemu těžby a objemu poklesu a zakládky (Eckart et al. 2004).



Obr. 1: Schéma koncepce komunikujících potrubí/nádrží prostřednictvím bodů pro přechod vody, implementované v GRAM code (Sherwood 1997).

Kontinuální numerické modely

I přes mnohoslibné výsledky a častou aplikaci semi-explicitních parametrických modelů v německém černouhelném průmyslu existuje rovněž řada kvalitně dokumentovaných modelů nárůstu hladiny podzemní vody, vytvořených pomocí kontinuálních numerických modelů. Většina modelů byla realizována pomocí softwaru MODFLOW (McDonald and Harbaugh 1988) a vychází z rovnic laminárního proudění. Ukazuje se však, že tyto modely narážejí v případě jejich aplikace v hornictví na některé své limity. Datový základ, nutný pro parametrizaci, je často rozsáhlý a / nebo není dostupný (Kim and Choi 2018). Kromě toho může být diskretizace modelového prostoru zkomplikována vyrubanými strukturami (Adams and Younger 2001). Nezávisle na tom byly pro kontinuální modely na základě modelů vyrubaných prostor s podrobnější diskreditací vytvořeny rozšiřující moduly, umožňující kombinovat laminární průtoky maticí s turbulentnějším prouděním v potrubí (např. MODFLOW-CFP (Shoemaker et al. 2005)). Nicméně zde chybí dokumentované zkušenosti z aplikace v důlních dílech.

3. Aktuálně vyvíjené modely

V německých černouhelných revírech při řece Sáře a v Porúří jsou pro modelování nárůstu hladiny důlních vod a s tím spojené zátěže používány převážně parametrizované modely. V oblasti reprezentativnosti geologie a parametrizace podzemních struktur a vyrubaných prostor jsou však tyto modely velmi zjednodušené. Výpočetně tak nelze zobrazit především komplexní vlastnosti proudění v podzemí (turbulentní při zatápění, laminární ve vyrubaných prostorách, darcyovské v průvodních hominách). Numerickými modely, diskretizovanými na základě znalosti stratigrafie a geologické struktury včetně antropogenně vytvořených důlních prostorů, lze implementovat hydraulicky relevantní struktury. Pro různé typy proudění jsou kromě toho k dispozici i odpovídající rovnice, které lze kombinovat geometricky diferencovaně. Různé pokusy s modely FEM přitom ukázaly, že především geometrie a prostorové dimenze důlních prostor mohou způsobovat problémy při konvergenci. Podstatný krok úspěšných modelů spočívá v pečlivé diskretizaci vyrubaných prostor a sousední horninové matrice, neboť zde se vyskytují nejvyšší gradienty fyzikálních parametrů. Mnohoslibných výsledků lze dosáhnout především pomocí nestrukturovaných, čtyřstěnných sítí, pomocí kterých je možno efektivně popsat drobné struktury ve velkých modelovaných oblastech.

Otázka vhodného modelu je rovněž otázkou dostupnosti dat a prostorového měřítka, které je k dispozici. Inverzní parametrizované modely podporují na jednu stranu rychlý a spolehlivý



výpočet sledované dynamiky důlních vod. Kalibrace pomocí objemových proudů přitom umožňuje vysokou přesnost předpovídaných křivek nárůstu a výpočet látkové zátěže v určitých vodních provinciích. Pomocí numerických postupů lze reálné proudění v důlních dílech popsat diferencovaněji a to včetně různých typů proudění. Modely však lze kvůli komplexitě obtížně diskretizovat a vyžadují i přísnou validaci okrajových podmínek. V případě dalšího vývoje numerických modelů pro nárůst hladiny důlních vod mohou jako cenná orientační pomůcka sloužit parametrizované modely, které by tedy měly být jako takovéto vědecky respektovány.

4. Literatura

- Adams, R., and P.L. Younger. 1997. "Simulation of Groundwater Rebound in Abandoned Mines Using a Physically Based Modelling Approach." *International Mine Water Association IMWA*, 353–62.
- Adams, R., and P.L. Younger, 2001. "A Strategy for Modeling Ground Water Rebound in Abandoned Deep Mine Systems." *Ground Water*. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2001.tb02306.x>.
- Azrag, E.A., V.I. Ugorets, and L.C. Atkinson. 2012. "Use of a Finite Element Code to Model Complex Mine Water Problems," 31–41.
- Burke, S.P., and P.L. Younger. 2000. "Groundwater Rebound in the South Yorkshire Coalfield: A First Approximation Using the GRAM Model." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 33 (2): 149–60.
<https://doi.org/10.1144/qjegh.33.2.149>.
- Eckart, M., Brüggemann, Hewig, Kunz, Langosch, Marzilger, Rüterkamp, Schiffer, and TeKook. 2004. "Abschlussbericht Resthohlraumvolumen."
- Gandy, C.J., and P.L. Younger. 2007. "Predicting Groundwater Rebound in the South Yorkshire Coalfield, UK." *Mine Water and the Environment* 26: 70–78.
<https://doi.org/10.1007/s10230-007-0153-7>.
- Kim, Sung Min, and Yosoon Choi. 2018. "SIMPL: A Simplified Model-Based Program for the Analysis and Visualization of Groundwater Rebound in Abandoned Mines to Prevent Contamination of Water and Soils by Acid Mine Drainage." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (5).
<https://doi.org/10.3390/ijerph15050951>.

- McDonald, Michael G., and Arlen W. Harbaugh. 1988. "A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model." *Techniques of Water-Resources Investigations*. <https://doi.org/10.3133/twri06A1>.
- Sherwood, J.M. 1997. "Modelling Minewater Flow and Quality Changes after Coalfield Closure." Newcastle University.
- Shoemaker, W Barclay, Eve L Kuniansky, Steffen Birk, Sebastian Bauer, and Eric D Swain. 2005. "Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005." *U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chapter A24*, 50.
- Toran, Laura, and Kenneth R. Bradbury. 1988. "Ground-Water Flow Model of Drawdown and Recovery Near an Underground Mine." *Ground Water* 26 (6): 724–33. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00423.x>.

Přehled numerických postupů v geotechnice

Prof. Dr. habil. Heinz Konietzky

Technická univerzita - Báňská akademie ve Freibergu, Geotechnický ústav

Numerické postupy lze rozdělit podle různých kritérií. Velmi smysluplné je jejich rozlišování podle prostorové a časové diskretizace:

- ohledně časové diskretizace lze rozlišit explicitní a implicitní metody,
- ohledně prostorové diskretizace lze rozlišit síťové a nesíťové modely.

V geotechnice byly nejprve používány síťové implicitní a explicitní postupy, jako například metoda konečných prvků (FEM), konečných diferencí (FDM) a metody okrajových podmínek (BEM). Později se objevily i nesíťové metody, jako Smooth Particle Hydrodynamics (SPH), různé částicové metody (PM) a metody diskrétních prvků (DEM).

Výhodou nesíťových modelů je možnost zobrazení velkých deformací a procesů míšení a dělení, které disponují automatickými postupy pro rozeznávání kontaktů. Jsou proto využívány pro řešení například následujících problémů (viz rovněž obr. 1 a 2):

- simulace pohybů hmot (řízení hornin, laviny, mury, atd.),
- simulace statických a dynamických procesů dezintegrace (vrtání, odstřel atd.),
- vlastnosti partikulárních (nesoudržných) hornin.

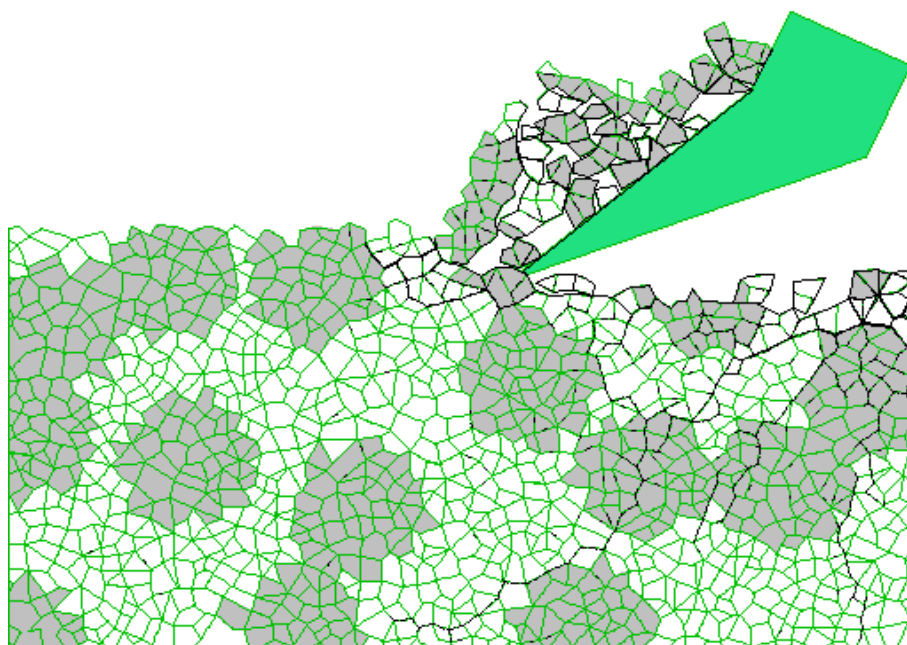
Nevýhodou nesíťových metod jsou zvýšené nároky na výpočet, dosud relativně málo zkušeností s jejich aplikací a skutečnost, že klasické látkové zákony zde nelze přímo aplikovat.

Výhodnou explicitních postupů je skutečnost, že je možno jimi bez problémů popisovat i fyzikálně nestabilní systémy (například kolize, chování v oblasti dodatečných závalů). Pro statistická řešení zpravidla vyžadují delší čas pro výpočet a interní tlumící algoritmy.

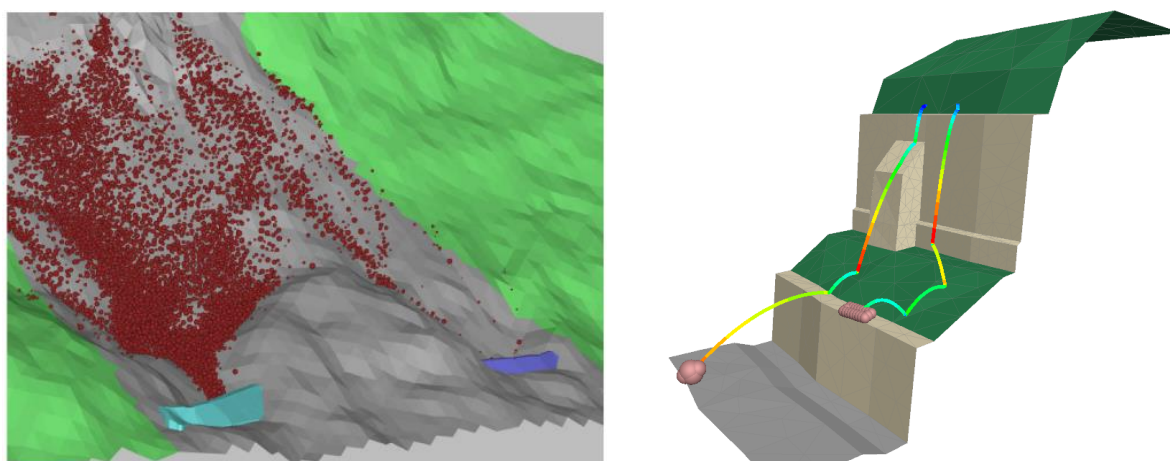
Kromě vlastního vývoje (například v univerzitním prostředí) mohou geotechnici volit mezi programy, jako jsou například ANSYS, ABAQUS, NASTRAN a další nebo speciálními geotechnickými programy, jako například FLAC, PLAXIS, RS3 atd.). První z uvedených programů splňují z geotechnického hlediska důležité vlastnosti a prvky pouze ve velmi omezeném rámci. To se týká látkových zákonů, ale i stavebních prvků, jako jsou kotvy, geotextilie atd. Z těchto důvodů se prosadil speciální geotechnický software.

V případě nasazení numerických programů v geotechnice je nutno zohlednit následující aspekty:

- výběr vhodné numerické metody, případně nástrojů,
- specifikací počátečních a okrajových podmínek,
- určení velikosti modelu,
- volba vhodných látkových zákonů a parametrů,
- propojení (struktura, hustota, typy prvků),
- prostorová dimenze (2D nebo 3D),
- využití symetrických podmínek při konstrukci sítě,
- sekvence modelování (například stavebně-technické kroky),
- interakce (HTMC = hydro-termálně-mechanicko-chemické, viz rovněž obr. 3),
- statická nebo dynamická simulace,
- efektivita vs. přesnost.



Obr. 1: Numerická simulace procesu řezání pomocí DEM

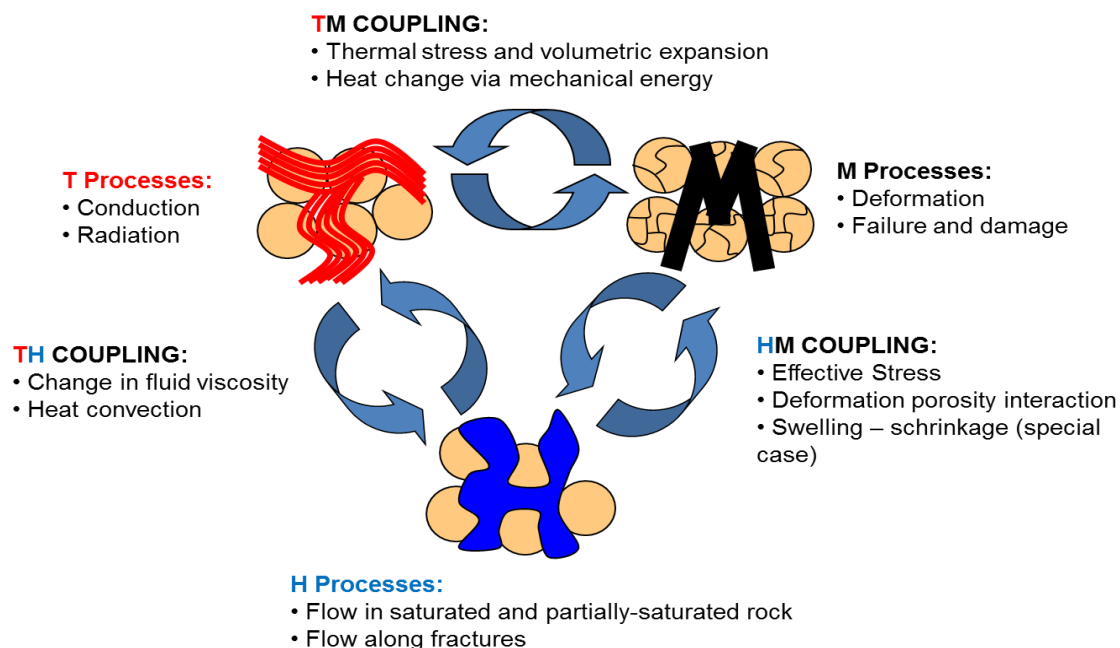


Obr. 2: Numerická simulace lavin (vlevo) a řícení skal (vpravo)

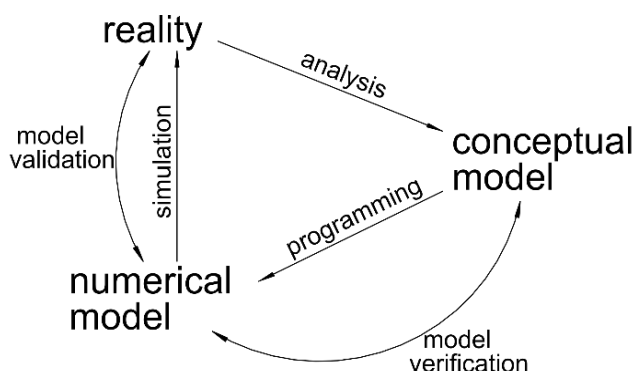
Numerické modely je nutno nejprve verifikovat a poté validovat. Verifikace znamená prokázat, že implementované algoritmy pracují správně. Pro tyto účely jsou výsledky numerických výpočtů porovnávány většinou s analytickými řešeními nebo řešeními, která byla získána pomocí jiných numerických postupů (benchmarking). Během fáze validace jsou simulované výsledky porovnávány s výsledky měření in-situ. Během validace je tedy ověřováno, zda numericky realizované fyzikálně-chemické procesy také proces in-situ popisují správně (viz obr. 4).

Z hlediska interakcí má zdaleka největší význam hydro-mechanická interakce. Možnosti interakcí jsou přitom různé, jednostranně nebo oboustranně působící.

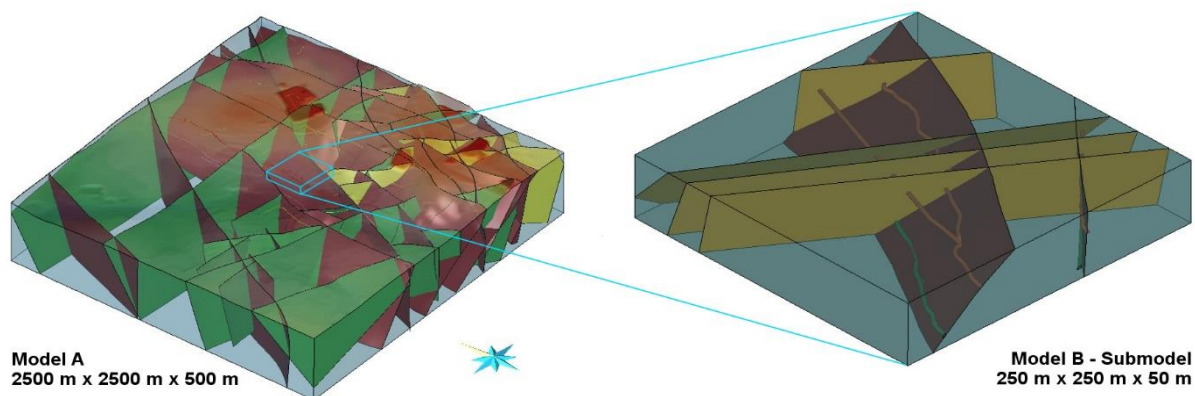
Dnes lze i velké modely (až do jednoho milionu zón, prvků nebo částic) počítat pomocí PC. V závislosti na velikosti modelu a zadání se rychlost výpočtu pohybuje v rozpětí mezi několika hodinami až po několik týdnů. V případě nutnosti lze používat techniky submodelů, kdy je jeden problém sledován v několika měřítcích, jak je zobrazeno na obr. 5.



Obr. 3: Ilustrace interakce THMC



Obr. 4: Verifikace a validace numerických modelů



Obr. 5: Technika submodelů (vlevo) a detailní submodel (vpravo)

DEM pro simulaci důsledků změn podzemní vody v krajinách po ukončení důlní činnosti na příkladu bývalého hlubinného revíru Lugau/Oelsnitz.

Gunther Lüttschwager

Technická univerzita - Báňská akademie ve Freibergu, Geotechnický ústav

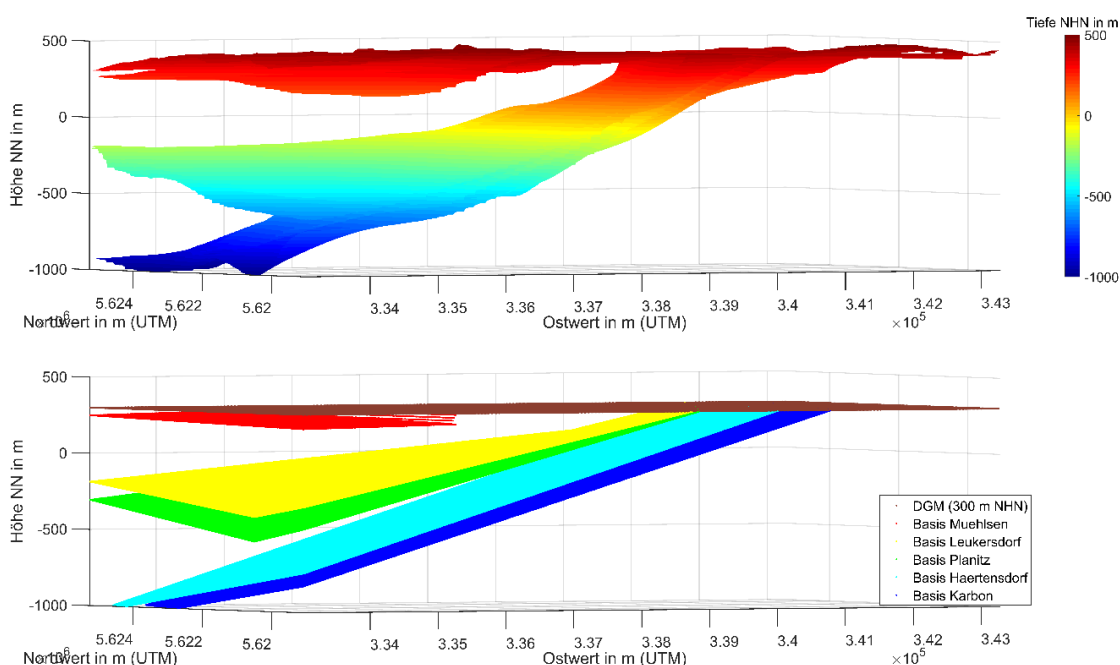
Pohyby terénu, vyvolané hornickou činností, se mohou na povrchu terénu projevovat ještě dlouho po ukončení důlní činnosti. Monitorování vlivů těžby na pohyby terénu vyžaduje komplexní a integrovaný výzkum. Přispět zde mohou například profily pro měření hladiny podzemní a důlní vody, měření nivelizace, sledování chemického složení důlních vod, satelitní radarová interferometrie a další metody. Na příkladu černouhleného revíru Lugau/Oelsnitz, v němž byla těžba ukončena v roce 1971 a jehož zatápění bylo započato již v roce 1970, má být navržena příslušná strategie.

Těžištěm výzkumu v rámci projektu GeoMAP je přitom lepší porozumění vertikálním pohybům terénu, které lze rozdělit zhruba do dvou kategorií:

- 1) 1) Sedání v důsledku deficitu hmoty, způsobeného vytěžením uhlí,
- 2) 2) Zdvihy v důsledku nárůstu hladiny důlní a podzemní vody po ukončení fáze aktivní důlní činnosti.

Prvním krokem je shromáždění všech dostupných dat a informací o řešeném území: to se geologicky nachází v podkrušnohorské depresi, která se utvořila během variskní orogeneze. Na ní se nacházejí černouhlené sedimenty svrchního karbonu, těžené během důlní činnosti. Svrchní karbon dosahuje v řešeném území své největší mocnosti v severozápadní části, kdy dosahuje 150 m a vystupuje severovýchodním směrem na povrch. Vlastní uhelná pole se dělí do nejméně 14 různých slojí. Jejich mocnosti se přitom pohybují mezi 0,6 m a 5,0 m (Beyer, 1974; Felix et al. 2007). Kvůli nedostatečným informacím o přesných mocnostech a komplexitě důlních děl lze pro účely modelování vycházet pouze ze zprůměrovaného

těžebního pole. Kvůli vysoké tektonické aktivitě Středosaského nasunutí se zlomy až 350 m (Rödlitzer Sprung) je vytvoření modelu celého území velmi náročné. Uložené vrstvy spodního permu jsou zjednodušeně rozdělovány do čtyřech formací (obr. 1). Třetihorní a čtvrtohorní sedimenty jsou shrnovány do jedné jednotky. Jelikož mají být v rámci modelování sledovány pouze vertikální pohyby, bylo provedeno zjednodušení topografie, kdy je horní hrana terénu ve výši 300 m n.m. považována za rovnou. Další geotechnicky relevantní zatížení terénu lze implementovat jako okrajovou podmínku. Jak je uvedeno na obr. 1 byla i geologie silně zjednodušena pomocí zčásti rovných hranic vrstev.



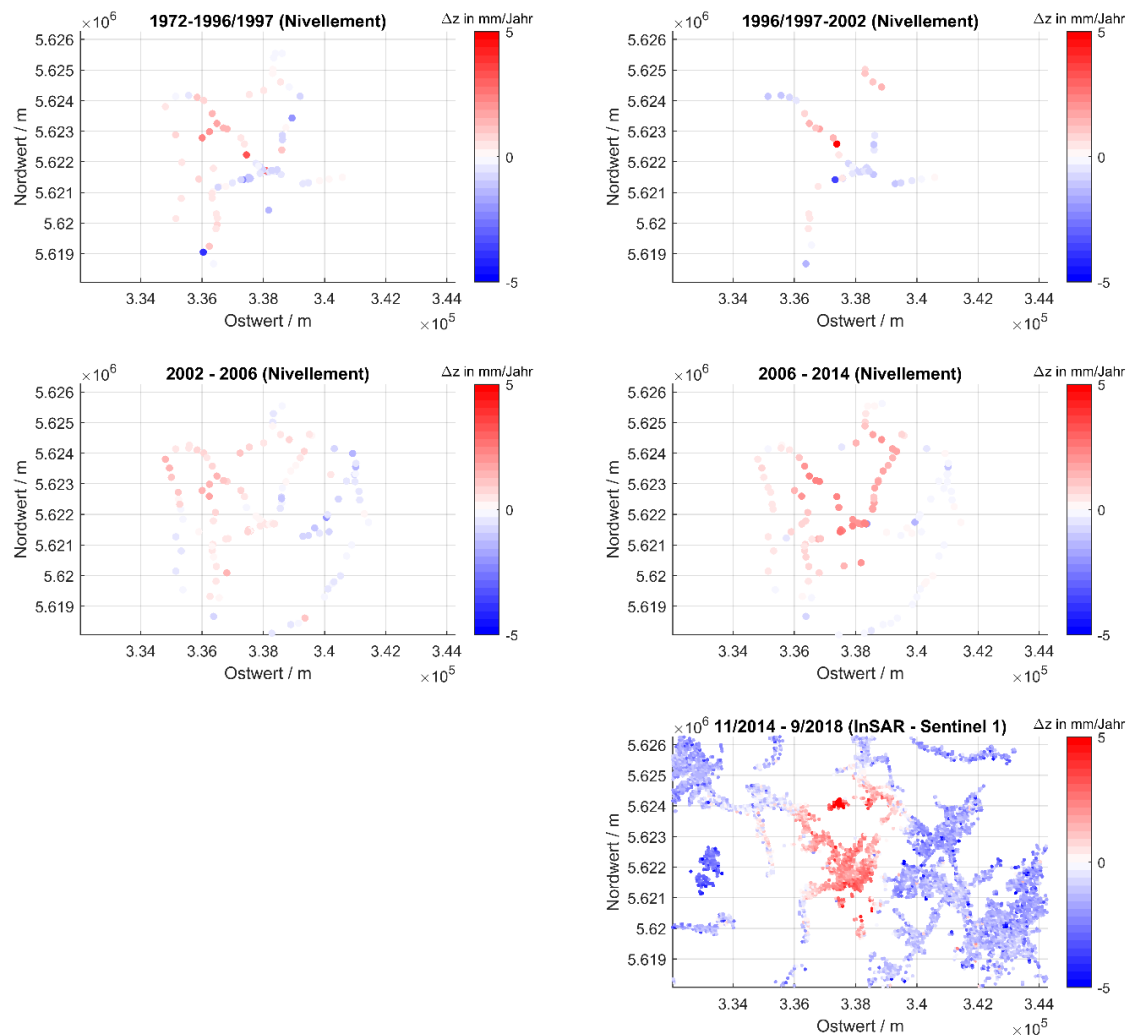
Obr. 1: Geologické horizonty v řešeném území. Shora: geologický model (Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii) Dole: Zjednodušení pro numerické modelování. Uhlenné sloje se nacházejí v karbonu mezi bází karbon a bází Härtensdorf.

Höhe NN in m	Nadmořská výška v m
Tiefe NHN in m	Hloubka NHN (standard elevation zero) v M
Nortwert	Severní hodnota
Ostwert	Východní hodnota

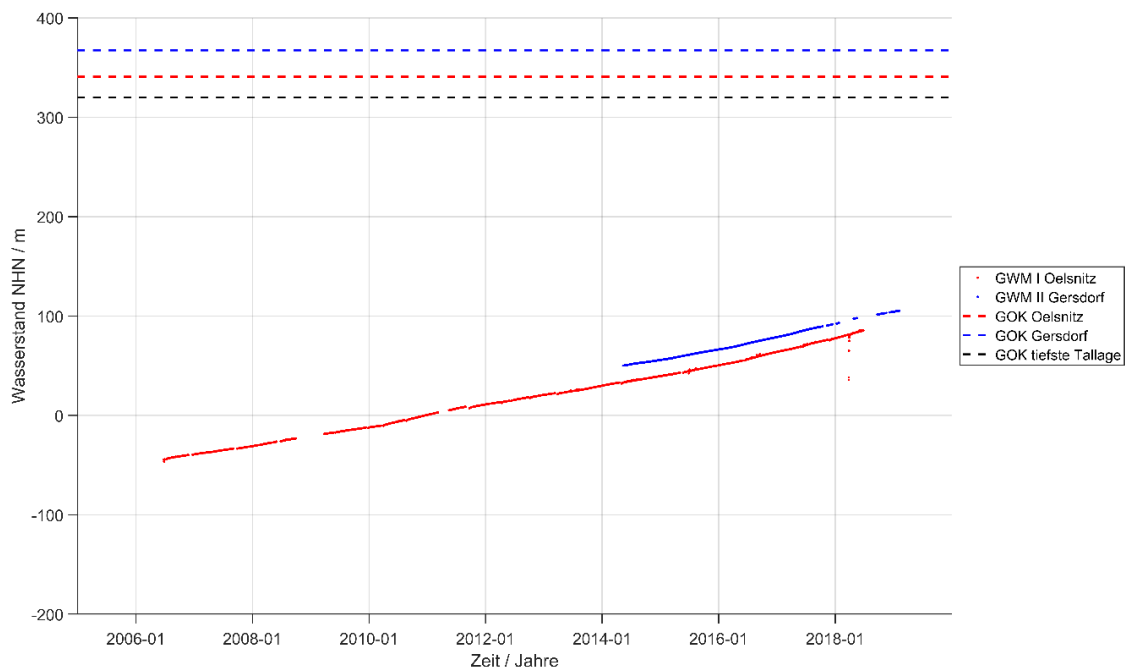
Poznatky o geotechnických vlastnostech jednotlivých oblastí pocházejí převážně z jádrových vrtů. Numerická realizace "zatápění" dolu měla být původně provedena pomocí hydraulicko-mechanických interakcí. Z důvodů velmi špatné hydraulické propustnosti horninových vrstev a hydraulické těsnosti většiny poruch (Beyer, 1974) bylo od modelování proudění důlních a podzemních vod upuštěno. Stoupající důlní vody tak lze numericky zjednodušeně zrealizovat změnou vlastností hornin a nárůstem tlaku pórové vody v předpokládaném důlním díle.

Dalším těžištěm prací je příprava dostupných dat z měření vertikálních pohybů terénu. Ta spočívají jednak na měření nivelizace a dále na satelitních měřeních InSAR (obr. 2). Nicméně se ukazuje, že z důvodů v porovnání s jinými podobnými doly velmi pomalého zatápění a míry elevace, pohybující se na hranici prokazatelnosti, lze naměřená data obtížně interpretovat. Další výzvou pro modelování jsou chybějící informace o vyzdvižení hrany terénu mezi lety 1972-1996. Vlastní zatápění je sledováno teprve od roku 2006 (vybudování měřicího profilu GVM I v Oelsnitz). Měřicí profil GWM II (Gersdorf), vybudovaný v roce 2014, kromě toho ukazuje, že hladina důlních vod není v dole všude stejná (obr. 3).





Obr. 2: Vertikální míry pohybu terénu v řešeném území v různých časových intervalech



Obr. 3: Hladiny podzemní vody na profilech Oelsnitz a Gersdorf

Wasserstrand NHN / m	Hladina vody NHN (standard elevation zero) / m
Zeit / Jahre	Čas / roky

Literatura:

- BEYER, C. u. a. (1974): Bergschadenskundliche Analyse „Lugau-Oelsnitz“. - Unveröff., VEB Baugrund Berlin, Produktionsbereich Zwickau & VEB Steinkohlenwerk Oelsnitz, Zwickau, Archiv Oberbergamt; Freiberg.
- FELIX, M. et al. (2007): Bergbaufolgen im ehemaligen Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz unter besonderer Berücksichtigung des Grubenwasseranstiegs. - Abschlussbericht. - Unveröff. Bericht, Archiv LfULG, Freiberg

Stav trojrozměrného modelování výsypek jako podklad pro geologické vyhodnocení povrchového dolu Nochten.

Roman Zschieschick, Lars Schumacher, Regine Grosser

Lausitz Energie Bergbau AG a.s.

Společnost LEAG představuje čtvrtého největšího provozovatele elektráren a druhého největšího provozovatele hnědouhelné těžby v Německu. Společnosti Lausitz Energie Kraftwerke AG, a.s., (LE-K) a Lausitz Energie Bergbau AG a.s., (LE-B) jsou na německém energetickém trhu aktivní pod společnou značkou LEAG. V roce 2018 bylo ve 4 aktivních lomech společnosti LE-B vytěženo 60,7 milionů tun hnědého uhlí, které bylo z převážné míry spáleno v hnědouhelných elektrárnách za účelem výroby elektrické energie.

Územně-plánovacím podkladem pro každý povrchový důl je příslušný hnědouhelný plán. Právními podklady pro aktivní provoz povrchu dolu jsou příslušný rámcový provozní plán a hlavní a mimořádné provozní plány. V závěrečných provozních plánech je z hlediska horního práva upravena problematika sanace a rekultivace území po ukončení hornické činnosti. Pro vyjmutí z důlního dohledu je nutno mimo jiné doložit trvalou stabilitu výsypek dolu a z velké části samoregulovaný vodní režim ve stavu po ukončení důlní činnosti.

Významnou součástí podkladů ke každému povrchovému dolu je prostorově-geografický model, který poskytuje informace o složení a stavu výsypek. Pro každý povrchový důl společnosti LEAG byl ve standardu ArcGIS na základě dat, získaných geodetickými měřeními, vytvořen model. Tyto modely zahrnují mimo jiné geometrická data výsypek z jednotlivých shozů skryvkových mostů a následné konečné úpravy zakladači. Všechny úrovně jsou souvislé, nepřekrývající se a jednoznačně modelované. Vytvoření prostorově-geografického modelu a jeho aplikace pro geotechnické vyhodnocení bude představena na příkladu povrchového dolu Nochten na dvou příkladech.

Geometrický model povrchového dolu Nochten



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

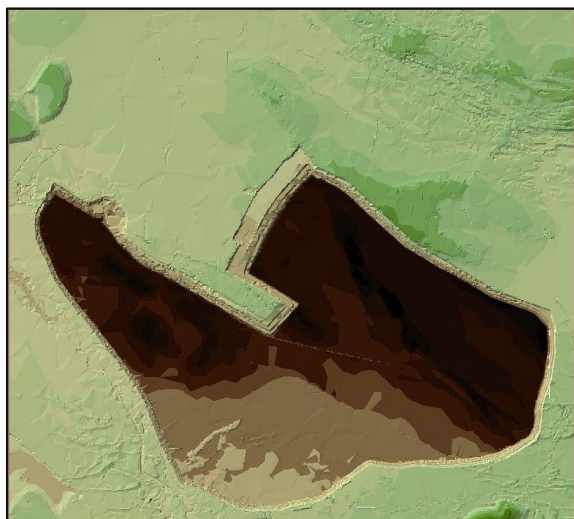


Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014–2020



Jámová forma povrchového dolu, skládající se z podloží a systému okrajových svahů (obr. 1) představuje plochu pro všechny následně uložené vrstvy výsypky. Na ní navazuje vnitřní výsypka skřývkového mostu a jednotlivé...shozy skřývkového mostu 1, 2 a 3. Nejvrchnější vrstvy výsypky vznikají pomocí zakladačů: základna zakladačové výsypky (dolní hrana zakladačové výsypky), hluboký násyp zakladačů (pracovní úroveň zakladačů) a vysoký násyp zakladačů. V případě, že nebylo realizováno ukládání zakladači, odpovídá nejsvrchnější vrstva výsypky planýrované, případně k tomuto datu dokončené haldě skřývky skřývkového mostu (obr. 2).

Letecké snímky, pravidelně snímány v rámci důlního měření, případně zákresy etáží, představují primární zdroj informací. Ty však jsou v digitální podobě k dispozici teprve od roku 1995. Aby bylo možno zajistit digitální využití dat, která byla předtím dostupná pouze v analogové podobě, byly stovky čtvrtletně pořizovaných provozních dokumentů, které jsou uloženy v archivech, prohledávány, skenovány, georeferencovány a digitalizovány. Relevantní prostorové informace pak byly extrahovány a shrnuty pomocí různých selekčních algoritmů. Pro čelní výsypku například činí celková modelovaná plocha cca 6.230 ha. V analogovém datovém území (1974 – 1995) bylo pro tyto účely celkem digitalizováno cca 3 500 výškových bodů. Z digitálních zdrojů bylo zpracováno cca 100 000 výškových bodů. Všechny modely byly ročně aktualizovány, přičemž každý výškový bod je opatřen časovým razítkem. Díky tomu mají tyto modely charakter 4D a umožňují tak časové a prostorové analýzy.



Obr. 1. Geometrický model Nochten - dutá forma / provozní podloží, stav: prosinec 2018



Obr. 2 Geometrický model Nochten - skryvkový most a zakladačová výsypka, stav: prosinec 2018

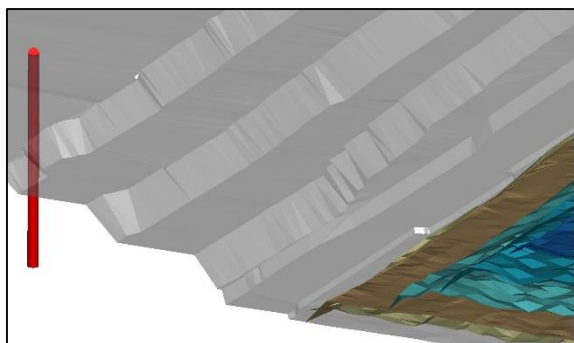
Prognóza a distribuce soudržnosti výsypky

Základem pro výpočet konsolidace skryvkových hmot jsou průzkumné geologické vrty v předpolí lomu a ve využitém území. Z petrografických měření ve vrtech v rostlém terénu jsou k dispozici údaje o petrografických vlastnostech. Tyto petrografické vlastnosti jsou po rozdělení na hrubou a jemnou frakci využity pro zjištění soudržnosti rostlého terénu.

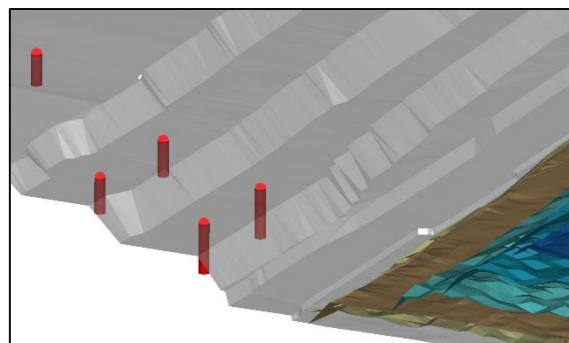
Takto zjištěná soudržnost vrstev však popisuje pouze komplexní skryvkové hmoty vertikálně (obr. 3). Přesun na stranu výsypky není v tento okamžik zohledněn, k tomu dojde později v rámci dalších kroků. Pro tyto účely jsou zeminy včetně jejich soudržnosti rozděleny do vrstev s přihlédnutím k umístění rýpadel, technologii transportu a zakládání skryvkovým mostem a případně následným řezům ze strany bagrů přesunuty na stranu výsypky

Vychází se z toho, že korečkové rýpadlo, navázané na skryvkový most, odebírá skryvku ve výškovém nebo hloubkovém řezu. Tím dochází k promíšení soudržnosti materiálů z jednotlivých stanovišť rýpadel při předávání na hlavní dopravník. Z průřezu osy stroje skryvkového mostu a jeho pojezdové osy jsou určována stanoviště rýpadel. S přihlédnutím k mocnosti je definován vážený střed, zaznamenaný v průřezu jako "soudržnost skryvkový most" (obr. 4 a obr. 5). Tyto kroky jsou provedeny odděleny podle výškového a hloubkového řezu.

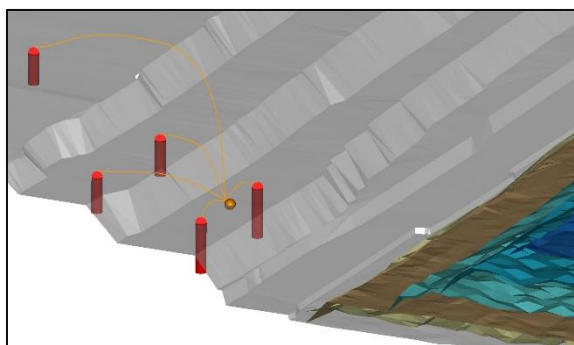
Během dalšího kroku jsou průměrné soudržnosti umístěny podle nastavení úhlů skryvkového mostu a rozestupů geometrie mostu na jednotlivé výhozy na straně výsypky (obr. 6) a znovu shrnuty. Tím získáme soudržnost celé skládky. Díky rozdělení, založení a následném složení soudržností, závislých na mocnosti, zůstává střední hodnota a standardní odchylka beze změn. V porovnání s propočty soudržnosti, vztaženými k vrtnému otvoru, však vzniká homogenní distribuce soudržnosti ve výsypce, která je bližší realitě.



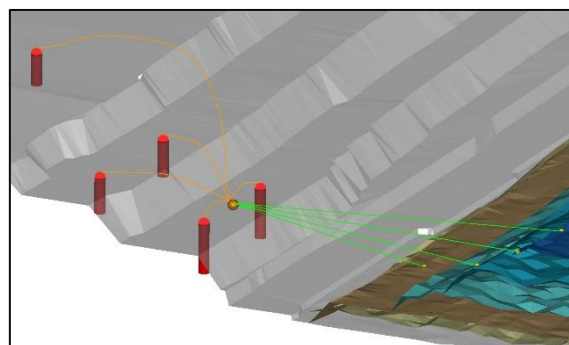
Obr. 3: Průzkumný geologický vrt - dělící plocha první vrt až provozní podloží



Obr. 4: Průzkumné geologické vrty - při zohlednění umístění bagrů a mocnosti řezu Brückenschnitte



Obr. 5: Průzkumné geologické vrty - souhrn na ose skryvkového mostu



Obr. 6: Průzkumné geologické vrty - přesun shrnutých soudržností na jednotlivé výhozy

Model podzemní vody pro lom Nochten

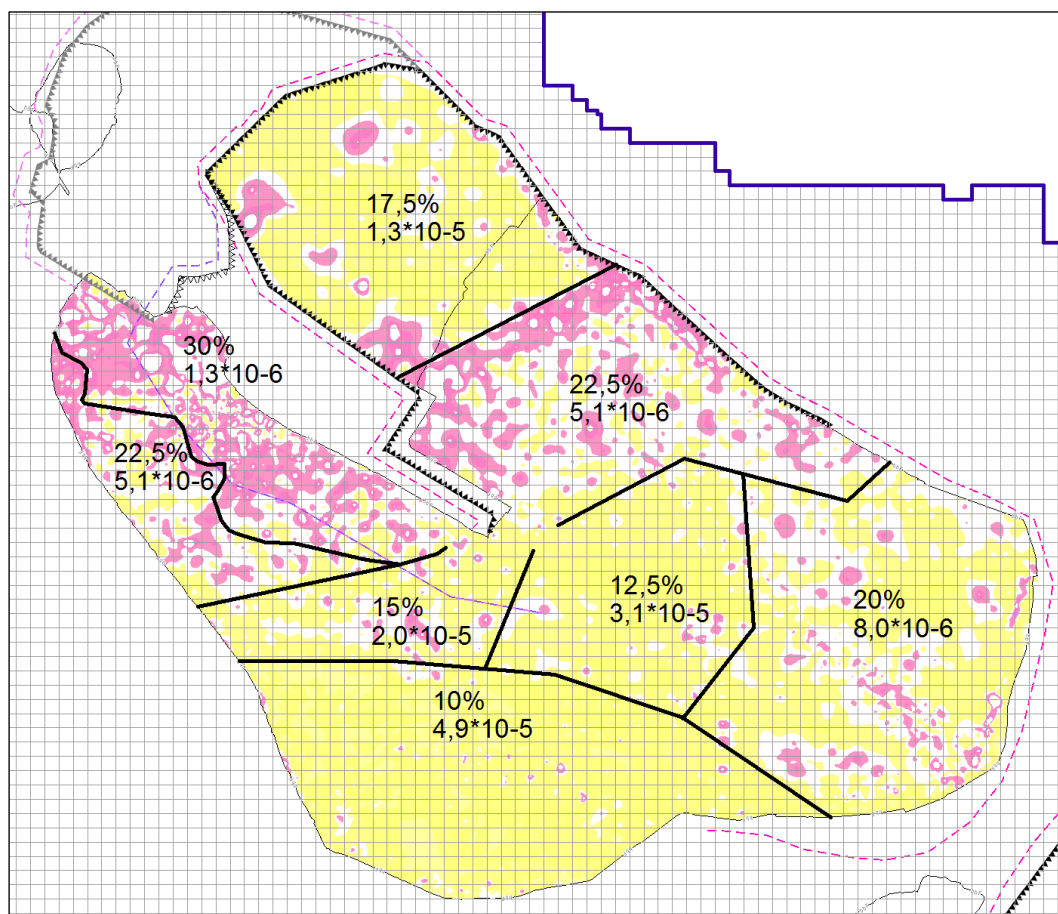
Pro prognózu vývoje stavu hladiny podzemní vody v lomu Nochten a v jím ovlivněném okolí, pro vymezení dosahu, pro zpracování prognóz budoucího čerpání vody a odhadu situace v oblasti podzemní vody v době po ukončení důlní činnosti je využíván hydrologický model. V tomto modelu jsou popsány podstatné geometrické a hydraulické vlastnosti modelovaného prostoru, například příslušné podloží a mocnost zvodnělých vrstev, propustnosti rostlé horniny i nasypaného materiálu. Dokumentace k výsypce (viz výše) je pro oblast výsypek povrchových dolů rozhodující, protože představuje validní a velmi dobře dokumentovaný zdroj dat. Hydrologický model samotný, stejně jako modelové výpočty pro kalibraci a prognózy, jsou vytvářeny systémem programů PCGEOFIM, průběžně udržovány a rozvíjeny. Systém programů PCGEOFIM počítá poměry v oblasti podzemních vod na bázi metody konečných objemů. Tento systém představuje nástroj, který je specificky zaměřen na požadavky hnědouhelného hornictví.

Proudění podzemní vody a stavy hladin podzemní vody v a v okolí povrchového dolu Nochten jsou počítány společně s lomem Reichwalde v hydrologickém modelu Nochten/Reichwalde. Hydrologický model je provozován nestacionárně a pokrývá období od roku 2007 do doby dosažení kvazistacionárního koncového stavu. Prostorově je model ohraničen na severovýchodě Mužákovskou vrásou (Muskauer Faltenbogen) a na západě řekou Sprévou (Spre). Na severu zasahuje až na severní břehy údolní nádrže Spremberg, na jihu pak až do oblastí jižně od obce Reichwalde. Na východě je model ohraničen tokem řeky Nisy (Neiße).

Hydrologický model Nochten/Reichwalde dělí modelované území v základním rastru do kvadratických buněk o délce hrany 200 m, ve kterých je složení přirozeného nebo nasypaného podloží popisováno pomocí sedmi vrstev modelu s různými hydraulickými vlastnostmi. Ústřední význam přitom mají poznatky ve vztahu na geometrickou stavbu podloží a jejich vztah k hydraulickým vlastnostem přirozených nebo nasypaných půd. Ve stavu ke květnu 2019 je v hydrologickém modelu Nochten/Reichwalde aktivních cca 94.000 prvků modelu, který má rozlohu cca 600 km².

Geometrie vrstev hydrologického modelu pro výsypku je přitom převzata z ploch výsypky, modelovaných v rámci dokumentace k výsypce. Tak například modelovaná zvodeň 3 je vymezena nadloží čelního odvalu dolů a nadloží výsypky skryvkového mostu nahoru. V

hydrologickém modelu s modelovou zvodní 3 je popisována skrývka skrývkového mostu (obr. 7).



Obr. 7: Distribuce soudržnosti ve skrývce skrývkového mostu jako základ pro odvození homogenních oblastí a parametrizaci prvků hydrologického modelu, zde modelová zvoděň 3 (údaje o průměrné soudržnosti v procentech a odvozeného koeficientu propustnosti v m/s). V pozadí je možno rozeznat bezpečnostní linie a hranice porubu lomu Nochten a základní rastr hydrologického modelu 200 m x 200 m.

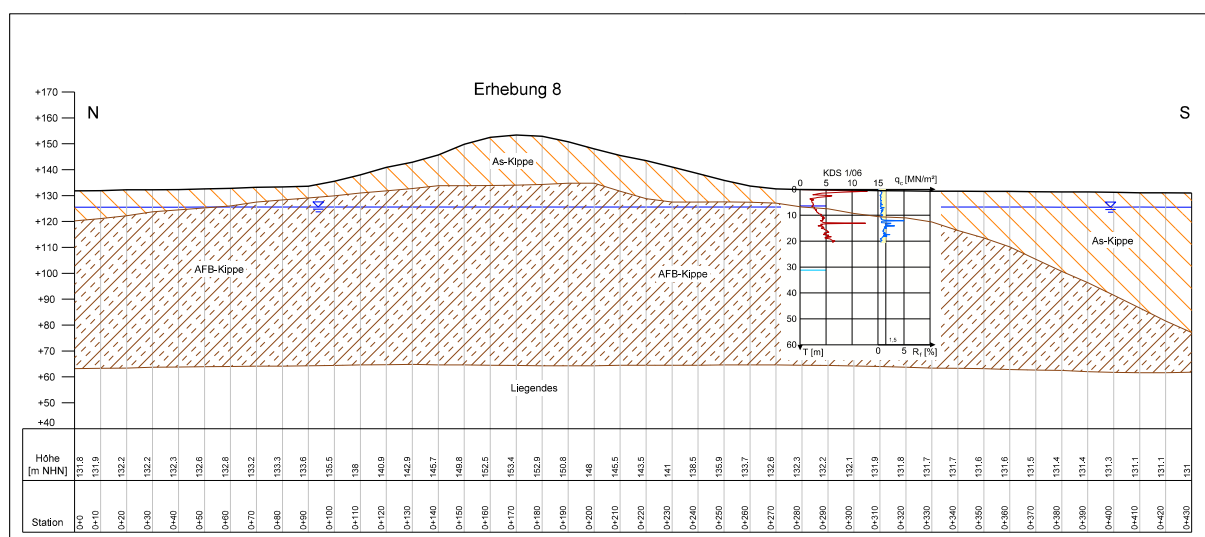
Parametrizace vrstev modelu, tzn. v podstatě zadání koeficientů propustnosti, je prováděna společným vyhodnocením výsledků průzkumu distribuce soudržných částí v jednotlivých vrstvách výsypky s výsledky půdně-fyzikálních průzkumů. Z posledně uvedeného je pro výsypku lomu Nochten za pomoci statistické analýzy odvozena specifická souvislost mezi koeficientem propustnosti a podílem jemné frakce. Díky tomu je možno přenést informace, získané bodově na vrtech, pomocí distribuce vazných podílů, modelovaných v dokumentaci k výsypce, do plochy. Pro shora jako příklad uvedenou výsypku skrývkového mostu byly pro tyto účely zjištěny oblasti homogenity stejné distribuce soudržnosti, kterou je možno doplnit o koeficienty propustnosti, získanými ze statistické analýzy.

Odhady například ke stavům hladiny podzemních vod po ukončení důlní činnosti nebo prognózy o vývoji hladin tak vycházejí z velké části z dat, odvozených z informací, shromážděných v dokumentaci k výsypce.

Výpočty stability pro výsypky v zadní části lomu Nochten

Na základě údajů geometrického modelu povrchového dolu a údajů o distribuci soudržnosti na příkladu výsypky skřývkového mostu lomu Nochten je možno realizovat geologické řezy.

Na obr. 8 je jako příklad zobrazen geologický řez vyvýšeniny v zadní části, odvozený z geometrického modelu lomu Nochten. Obsah geologického řezu tvoří kromě výškových údajů provozního podloží příslušné úrovně výsypky skřývkového mostu a zakladačové výsypky.



Obr. 8: Geometrický řez výsypkou lomu Nochten v oblasti skřývkového mostu, areál severně od Nochten, stav prosinec 2017 (průkaz stability lomu Nochte, areál severně od Nochten ze dne 8.5.2018, IGF Freiberg)

Erhebung	Vyvýšenina
AFB-Kippe	Výsypka skřývkového mostu
As-Kippe	Zakladačová výsypka
Liegendes	Podloží
Höhe m NHN	Výška v m NHN (standard elevation zero)

Station	Stanice
---------	---------

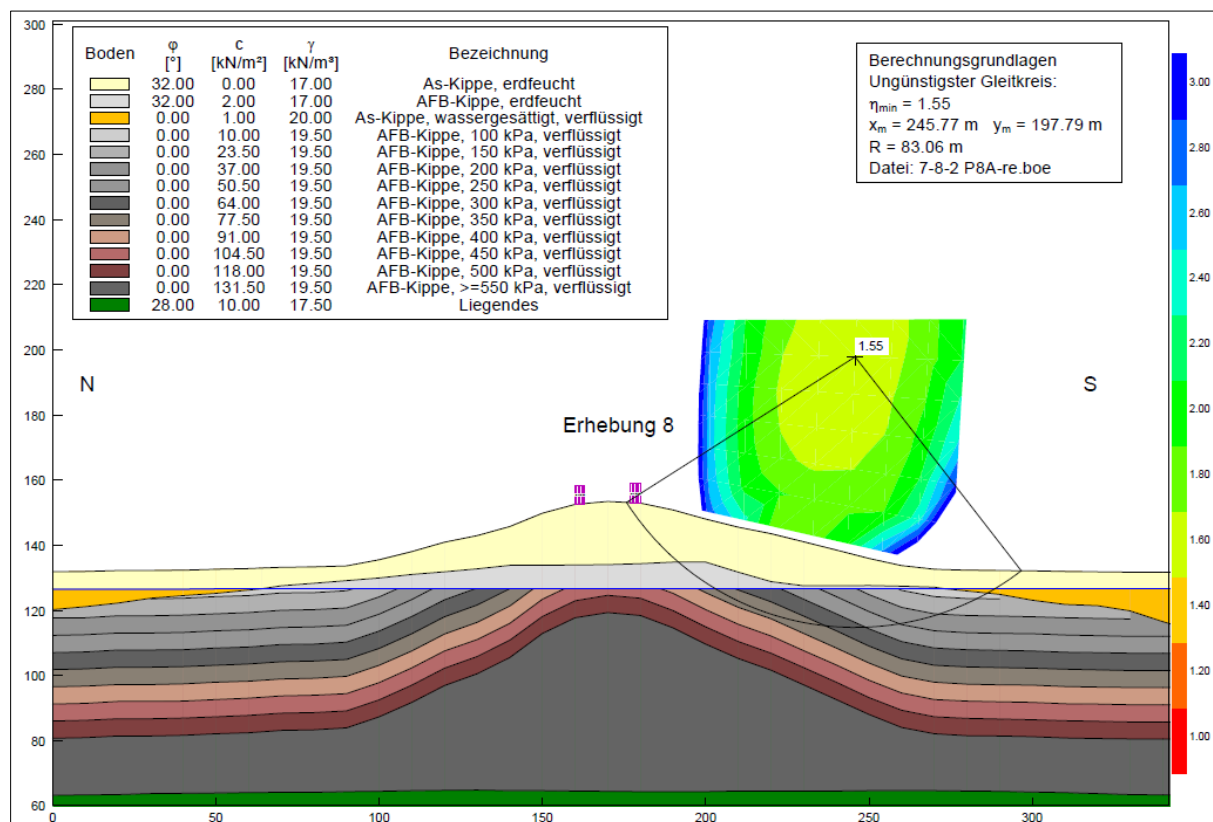
Podobná zobrazení lze odvodit rovněž pro distribuci soudržnosti lomu. Zobrazené řezy zde ukazují kromě výškových údajů z geometrického modelu pro jednotlivé vrstvy výsypky rovněž různé podíly v rámci vrstev výsypky.

Na jejich základě je možno určit pro konkrétní objekty průzkumná opatření k určení potřebných půdně-mechanických parametrů a pevností ve vlhkém a nasyceném stavu různých výsypek, které závisejí na napětí. Jedná se přitom o vyhloubení průzkumných vrtů ve výsypkách za účelem získání vzorků s narušenou strukturou, případně o vyhloubení tlakových sond, případně radiometrických kombinovaných tlakových sond (viz rovněž obr. 8).

Na základě výsledků těchto průzkumů a vyhodnocení půdně-fyzikálních průzkumů jsou stanoveny parametry výpočtu, které jsou nutné pro výpočet stability.

Na obr. 9 je zobrazen model výpočtu a výsledek výpočtu stability s přihlédnutím k údajům z dokumentace k výsypce, k hodnotám prognózy stavu podzemní vody ve výsypce ve stavu po ukončení důlní činnosti a parametrům výpočtu, odvozených pro konkrétní objekty v zadní části lomu Nochten (příklad na obr. 8). Na základě výsledku výpočtu stability je v potřebné míře doložena stabilita stavu po ukončení důlní činnosti.

Není-li tomu v daném případě tak, pak to znamená ohrožení veřejné bezpečnosti ve stavu po ukončení důlní činnosti. Pro tento případ je třeba přijmout opatření, pomocí kterých je pozdější ohrožení možno vyloučit.



Obr. 9: Model výpočtu stability výsypky s přihlédnutím k údajům z dokumentace k výsypce, hydrologickému modelu a poznatkům z terénního průzkumu, stav prosinec 2027 (doklad o zajištění stability lomu Nochten, areál severně od Nochten ze dne 8.5.2018, IGF Freiberg)

Erhebung	Vyvýšenina
AFB-Kippe	Výsypka skrývkového mostu
As-Kippe	Zakladačová výsypka
Liegendes	Podloží
Höhe m NHN	Výška v m NHN (standard elevation zero)
Station	Stanice
Boden	Půda / zemina
Bezeichnung	Označení
Berechnungsgrundlagen	Základ pro výpočet

Ungünstiger Gleitkreis	Nepříznivá smyková kružnice
Datei	Soubor
verflüssigt	Ztekucené

Shrnutí

Stoupající podíl ploch výsypek v lužických povrchových dolech si v uplynulých letech vyžádal souvislé zpracování historie vzniku těchto výsypek. Z tohoto důvodu byly pro každý povrchový důl společnosti Lausitz Energie Bergbau AG a.s. jeho geometrická data zanesena do příslušných podkladů. Geometrická data jednotlivých výsypek byla před rokem 1995 k dispozici pouze v analogové podobě a vyžadovala řadu komplexních rešerší a digitalizaci. Výsledkem jsou digitální data pro každý povrchový důl v prostorově geografickém systému, která představují důležitý základ především pro řešení geotechnických problémů. Výslovně je třeba upozornit na skutečnost, že se jedná o dynamický systém, který je každoročně aktualizován.

Využití těchto dat bylo představeno na dvou příkladech z lomu Nochten. V modelu podzemní vody pro prognózu proudění podzemní vody a stavy hladin podzemní vody a pro výpočty stability výsypek v době po ukončení důlní činnosti.

