ResiBil – Bilance vodních zdrojů ve východní části česko-saského pohraničí a hodnocení možnosti jejich dlouhodobého užívání

# Hydrogeologie česko-saské křídové pánve mezi Krušnými horami a Ještědem



Z. Hrkal, D. Rozman and P. Eckhardt (eds.)



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





### Hydrogeologie česko-saské křídové pánve

mezi Krušnými horami a Ještědem





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



ResiBil – Bilance vodních zdrojů ve východní části česko-saského pohraničí a hodnocení možnosti jejich dlouhodobého užívání

## Hydrogeologie česko-saské křídové pánve mezi Krušnými horami a Ještědem

Z. Hrkal, D. Rozman and P. Eckhardt (eds.)

O. Nol, Š. Mrázová, V. Nakládal, M. Pohle, F. Mihm, S. Mittag, A. Rommel







Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka veřejná výzkumná instituce Projekt ResiBil byl financován z Evropského fondu pro regionální rozvoj z Programu spolupráce Česká republika – Svobodný stát Sasko 2014–2020, registrovaný pod číslem 100267011.

Na řešení geologických a hydrogeologických podkladů se jako hlavní partner podílela německá strana, zastoupená Saským zemským úřadem pro životní prostředí, zemědělství a geologii (LfULG) a na české straně projektoví partneři Česká geologická služba (ČGS) a Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i. (VUV TGM, v. v. i.).

Recenzent: Zuzana Boukalová

Fotografie na obálce: Pohled do údolí Labe (foto K. Motyčková a J. Šír, 2013) Fotografie na frontispisu: Pramen König-Johann (foto P. Tomanová Petrová 2017)

© Zbyněk Hrkal a kol., 2020

ISBN 978-80-87402-88-7

### Obsah

1   Úvod
2  Metodika prací 10
3  Terénní práce
3.1. Stručný přehled geologických prací 11
3.2. Hydrogeologické vrtné práce 13
3.3. Karotáž
3.4. Měření průtoků
3.5. Evidence pramenních vývěrů 23
4 Matematické modelování
4.1 Hydrologické bilanční modelování 27
4.1.1. Modelování vodní bilance v oblasti Děčínského Sněžníku a Křinice 27
4.1.2. Modelování vodní bilance v oblasti Lückendorf
4.2. Konceptuální modely 30
4.2.1. Všeobecné hydrogeologické podmínky 31
4.2.2. Klimatické podmínky 31
4.2.3. Oblast Děčínského Sněžníku
4.2.4. Oblast Hřensko/Křinice 36
4.2.5. Oblast Lückendorf
4.3. Hydraulické modely 41
4.3.1 Hřensko – Křinice 42
Koncepce řešení 42
Geometrie a typ vrstev
Vstupní parametry 44
Kalibrace
Simulované proudění podzemní vody 45
Vliv čerpání podzemní vody a infiltrace na režim a stav podzemních vod 46
Výpočet přírodních zdrojů a využitelného množství podzemní vody,
střety zájmů
4.3.2. Děčínský Sněžník 48
Koncepce řešení 48
Geometrie a typ vrstev
Vstupní parametry 49
Kalibrace

Simulované proudění podzemní vody 51
Výpočet přírodních zdrojů a využitelného množství podzemní vody 56
4.3.3. Lückendorf
Koncepční model 52
Geometrie a druhy vrstev 53
Vstupní parametry 53
Kalibrace
Simulované proudění podzemní vody 56
Výpočet přirozených zásob podzemní vody a využitelných zásob
podzemní vody 57
4.4. Výsledky modelových simulací 57
4.4.1. Modelové scénáře 57
4.4.2. Modelové scénáře pro modelové území Lückendorf
5   Závěry
<b>Slovníček pojmů</b>
Použitá literatura

### 1 Úvod

ResiBil je mezinárodní projekt podporovaný Evropským fondem pro regionální rozvoj z Programu podpory přeshraniční spolupráce Česká republika – Svobodný stát Sasko 2014–2020, registrovaný pod číslem 100267011. Projekt probíhal v letech 2016–2020.

Na řešení geologických a hydrogeologických podkladů se jako hlavní partner podílela německá strana, zastoupená Saským zemským úřadem pro životní prostředí, zemědělství a geologii (LfULG), a na české straně projektoví partneři reprezentovaní Českou geologickou službou (ČGS) a Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, v. v. i. (VUV TGM, v. v. i.).

Obr. 1-1: Polygon celého území projektu s vyznačenými původními a rozšířenými pilotními oblastmi pro hydrogeologický model. (Mrázová et al. 2020).



Projektové území je situované na severozápadním okraji české křídové pánve. Jde o mocnou sedimentační pánev se systémem několika kolektorů podzemních vod a významným vodohospodářským potenciálem. Výskyt podzemní vody je vázaný na rozpukané zóny a na póry v horninovém prostředí. Další oblasti projektového území jsou charakterizované krystalinickými horninami magmatického a metamorfického původu. V těchto oblastech se podzemní vody vyskytují především v rozpukaných zónách a v přípovrchové vrstvě zvětralých hornin a kvartérních sedimentů. V těchto podmínkách vznikly mělké kolektory menšího rozsahu a pouze lokálního významu. Projekt ResiBil je proto zaměřen na významnější zdroje podzemní vody v oblasti české křídové pánve s přeshraničním rozsahem.

Rozloha celého zájmového území dosahuje 1 888 km<sup>2</sup>, ve kterém byly vymezeny tři pilotní oblasti: Děčínský Sněžník, Hřensko-Křinice/Kirnitzsch a Lückendorf. Původně plánovaný rozsah pilotních oblastí při předložení projektu byl menší (černé linie), avšak z důvodu vytvoření rozsáhlejšího hydrogeologického modelu byly oblasti rozšířeny (plochy s červenou, modrou a žlutou šrafou), jak znázorňuje obr. 1-1.

Z hydrogeologického hlediska je zájmové území rozdělené především tektonicky. Významnou hranicí je řeka Labe, která dělí sousedící modelové oblasti Děčínský Sněžník na levém břehu (západně od Labe) a Hřensko/Křinice na pravém břehu (východně od Labe). Zároveň je Labe hlavní drenážní bází v oblasti. Děčínský Sněžník je děčínsko-doubickým zlomovým pásmem, navazujícím na krušnohorský zlom, rozdělen na menší jižní část a zbytek severně od zlomového pásma. Další významnou strukturou je děčínsko-doubické zlomové pásmo, podél kterého došlo k zaklesnutí dílčích ker pánve. V zaklesnuté východní části je vymezená modelová oblast Lužické hory (u obcí Lückendorf, Oybin a Petrovice).

Kolektory v zájmovém území české křídové pánve tvoří obecně pískovce, zatímco ostatní litologické typy s větším podílem jílu a prachu tvoří izolátory a poloizolátory. Hydrogeologický konceptuální model území rozlišuje až 4 oddělené kolektory:

- Kolektor 4 neboli kolektor A je nejnižší hlubinný cenomanský kolektor tvořený střídajícími se polohami pískovce, slepence a prachovitého až jílovitého pískovce. Jeho mocnost dosahuje až 80 m na Děčínském Sněžníku a až 140 m u lužické poruchy na severu zájmového území.
- Kolektor 3 neboli hlavní kolektor (B) s nejvýznamnějšími odběry podzemní vody v oblasti tvoří křemenné, méně i prachovité a slínité spodnoturonské pískovce. Izolátor mezi kolektory 3 a 2 (3/2) je lépe definován na S v saské části povodí Křinice. V centrální části zájmového území izolátor postupně ztrácí svoji funkci. Jižně od toku řeky Kamenice a v oblasti Děčínského Sněžníku je funkce izolátoru 3/2 omezena a nelze ji adekvátně definovat. Proto v těchto částech konceptuální model předpokládá spojený kolektor 2+3 (BC). Jeho mocnost dosahuje až 230 m.
- Kolektor 2 vzniká ve středně turonských pískovcích. Lze ho vymezit v sz. části oblasti Hřensko/Křinice nad izolátorem 3/2.
- V případě kolektoru 1 (pískovce v teplickém až merboltickém souvrství stáří svrchní turon až santon) jde o menší, nesouvislé výskyty, které nelze definovat dostatečně přesně. Na většině plochy modelové oblasti jsou kolektory 1, 2 a 3 hodnocené jako jeden spojený turonský kolektor.

Cílem projektu RESIBIL bylo stanovení bilance a zhodnocení možnosti dlouhodobého využívání zdrojů podzemních vod a udržitelného hospodaření s nimi v závislosti na očekávaných dopadech vlivu klimatických změn. Z provedených studii a modelů vyplynulo, že důvodem změn vodního režimu a vodní bilance v krajině jsou jak klimatické vlivy (roky chudé na srážky), tak i antropogenní vlivy (zvýšené odběry podzemních vod). V rámci projektu byl rovněž na některých oblastech posuzován vliv vodního režimu půd na akumulaci podzemních vod. Na základě dosavadních zkušeností a poznatků získaných při výzkumu klimatických změn a jejich dopadu na životní prostředí je možné dlouhodobě počítat s poklesem tvorby nové podzemní vody. Analýza a hodnocení stability vodních zdrojů a ekosystému vůči změnám klimatu a povětrnostních podmínek probíhaly ve třech výše uvedených pilotních příhraničních oblastech (obr. 1-1).

Prostřednictvím projektu byl vytvořen systém navazujících modelů, který přispěje k efektivnímu využívání podzemních vod a k zodpovězení společných otázek v oblasti odhadů zásob, vodohospodářského plánovaní a institucionální spolupráce.

### 2 Metodika prací

Ambiciózní cíl s přeshraničním dopadem a výrazně multidisciplinárním zaměřením vyžadoval velmi komplexní metodiku prací. Pilířem hydrogeologických a vodohospodářských analýz bylo sestavení jednotného přeshraničního geologického modelu v 3D podobě. Sjednocení různých interpretací geologické stavby na obou stranách státní hranice bylo nezbytnou podmínkou pro navazující sestavení konceptuálního 3D hydrogeologického modelu. Pro jeho návrh byla použita série dva roky probíhajících přípravných terénních prací, které se zaměřily na geometrické vymezení hlavních kolektorů a izolátorů a získání kvantitativních charakteristik. Pro tyto účely byly realizovány průzkumné hydrogeologické vrty, které byly po aplikaci komplexních karotážních metod, přeměněny na vrty monitorující hladinu podzemní vody. V rámci terénních prací byla provedena podrobná inventarizace pramenních vývěrů a pro modelové řešení byly na vybraných vodních tocích změřeny tzv. postupné profilové průtoky. Jako jeden ze vstupů do hydraulického modelu byl sestaven hydrologický bilanční model a vytvořena databáze všech jímaných vodohospodářských objektů, zahrnující časové řady jejich využití.

Z těchto podkladových materiálů byly sestaveny hydraulické modely, které byly následně kalibrovány na historická data a staly se nástrojem pro simulace dalšího vývoje.

Finálním výstupem byla simulace různých variant vývoje sledovaných vodohospodářských struktur a kalkulace využitelných zásob podzemní vody.

Následující text představuje výsledky těchto postupů.

### 3 Terénní práce

#### 3.1. Stručný přehled geologických prací

Cílem úvodní etapy práce bylo sestavit ve spolupráci s německými kolegy společnou geologickou mapu zahrnující jak českou, tak saskou část zájmové oblasti (obr. 3-1). Práce poskytly nová data a informace z regionální geologie, petrografie i tektoniky. Tyto geologické práce posloužily jako vstup do návazných prací hydrogeologického charakteru, především při tvorbě konceptuálních modelů.

Vlastní geologické práce využívaly celou řadu moderních vědeckých postupů, jejich cílem bylo poskytnout pro hydrogeologický model 3D geologický koncept hlavních kolektorů a izolátorů, včetně jejich tektonického porušení. Významnou činností byla korelace různých geologických pojetí a interpretací v obou státech do jedné jediné podoby.

Primární poznatky přinesl geofyzikální průzkum. Ten umožňuje nalézt, ověřit a upřesnit tektonické poruchy (zlomy, přesmyky, násuny) pomocí geofyzikálních metod jako jsou tíhová měření, seizmický a geoelektrický průzkum a elektromagnetické metody.

Na základě změn fyzikálních vlastností hornin bylo možno identifikovat např. zlomy jako lineární zóny do hloubky se sníženým zdánlivým odporem, sníženými rychlostmi seizmických vln a snížením hustoty horninového prostředí. Úkolem geofyzikálních měření bylo přispět k sestavení koncepčního geologického modelu a v detailním měřítku určit hloubku a charakter litologických rozhraní a zlomů. Pro regionální popis geologické stavby byla využita podrobná tíhová měření (gravimetrie). Z existujících více než 400 000 tíhových dat (hustota bodů byla 2-4 body na km<sup>2</sup>) na území České republiky a Saska byla sestavena gravimetrická mapa úplných Bouguerových anomálií pro celou studovanou oblast. Mapa přinesla informace o hustotách horninového prostředí do velkých hloubek (desítky km). Zobrazené hodnoty tíhového zrychlení odpovídají hustotám hornin ve vertikálním směru. Korelace mapy tíhových anomálií a sjednocené geologické mapy umožnila definovat hranice granitových těles, rozsah depresí a elevací v podloží křídových sedimentů, významná vulkanická centra a nalézt pravděpodobné kontakty regionálních geologických jednotek. V tíhové mapě bylo možné vyznačit také tektonické linie a spolu s výsledky podrobného geologického mapování definovat jejich charakter (zlom, přesmyk) (Obr. 3-2).

V rámci realizace projektu ResiBil byly odvrtány dva průzkumné geologické jádrové vrty: vrt 4650\_Y Jedlová a vrt 6412\_L Lesné. Práce zahrnovaly vrtné práce, geologickou dokumentaci a karotážní práce včetně testování sledovaných kolektorů. Vrt 4650\_Y dosáhl hloubky 200,20 m, vrt 6412\_L dosáhl hloubky 101,25 m. Primárním cílem průzkumného geologického vrtu 4650\_Y bylo ověření profilu napříč teplickým a březenským souvrstvím (coniac), které v oblasti Lužických hor dosahuje celkové mocnosti kolem 300 m.

Cílem průzkumného geologického vrtu 6412\_L bylo ověření existence sekvence hornin permokarbonu na lužickém zlomu, tektonické struktury 1. řádu, která odděluje kolektorské



Obr. 3-1: Náhled geologické mapy zájmového území v sasko-české křídové pánvi (Mlčoch et al. 2018). horniny svrchní křídy české křídové pánve od granitoidů lužického masivu. Geologický vrt byl ukončený v hloubce 101,25 m. Hlavním přínosem vrtu bylo získání nových cenných dat o geologické stavbě lužického zlomu.

Získané poznatky umožnily sestavení prostorového koncepčního geologického modelu, pro jehož tvorbu byly využity softwary pro 3D modelování (Surfer, Gocad, MOVE). Z vrtů a geofyziky byla definována geologická stavba území do hloubky okolo 1 000 m a průběh jednotlivých rozhraní mezi stratigrafickými nebo litologickými vrstvami.

Vrstvy vycházející na povrch byly doplněny daty současného reliéfu podle sestavené sjednocené geologické mapy. Do modelu byly zadány ve zjednodušeném plánu hlavní zlomy. Výsledný model byl jedním ze vstupních parametrů pro následné hydrogeologické modelování proudění podzemních vod ve studované oblasti. 3D model byl vytvořen z celkového počtu 1 285 300 dat, z toho bylo použito 64 800 údajů z vrtné databáze a 650 údajů z geofyzikální databáze ČGS. Každá vrstva modelu obsahuje také data současných výchozů na povrchu, získaných ze sestavené společné geologické mapy.

Geologická data byla následně využita při tvorbě konceptuálního hydrogeologického modelu. Pro každou z modelových lokalit byly sestaveny modelové stratigrafické profily s vyznačením kolektorů a izolátorů (Obr. 3-3).

#### 3.2. Hydrogeologické vrtné práce

V rámci průzkumných hydrogeologických prací byla nejprve provedena podrobná rešerše všech dosud provedených hydrogeologických vrtných prací. Základ tvořily podklady ČGS Geofond, které byly doplněny o informace z osobního archivu RNDr. Nakládala. Plošná a prostorová interpretace dat umožnila definovat prostor nejistot, to znamená prostředí, kde pro definování konceptuálního modelu chyběla potřebná data. Mezi tato území spadala Obr. 3-2: Gravimetrická mapa zobrazující Bouguerovy anomálie a důležité tektonické poruchy (Sedlák et al. 2019).





především oblast severní části českého území Děčínského Sněžníku v Maxičkách a na lokalitě Sněžník. Zde byly vyprojektovány dva průzkumné hydrogeologické vrty, které byly realizovány v září 2017 firmou Advera.

Vrt RE 001 Sněžník byl odvrtán bezjádrovou technologií do hloubky 99 metrů. Až do hloubky 4 metrů bylo vrtáno průměrem 245 mm, zbývající část vrtu až do hloubky 99 metrů vrtným průměrem 187mm. Hladina podzemní vody byla naražena v hloubce 78 metrů.

Vrt by vystrojen definitivní výstrojí PVC o průměru 125 mm a síle stěny 7,5 mm se závitovými spoji až do konečné hloubky. Interval perforovaných trubek je od úrovně 60 m pod terénem až do 99 m. Obsyp byl proveden plaveným kačírkem do hloubky 45 m. Po ověření úrovně obsypu karotážním měřením byla zbývající část mezikruží vrtu zajílována a zacementována. Na vrtu bylo zhotoveno zamykatelné zhlaví.

Oba vrty byly osazeny automatickým datalogerem na kontinuální měření hladiny podzemní vody. Tato data byla následně využita při kalibraci modelů.

Následující obrázek demonstruje ukázku zaznamenaného poklesu hladiny podzemní vody v monitorovacím vrtu RE 001 Sněžník v důsledku nízkých srážkových úhrnů.

Obr. 3-3:

Schematizované litologické profily v jednotlivých

(Nádaskay 2020).



Obr. 3-4: Způsob uchycení čidla měření hladiny podzemní vody ve vrtu



Obr. 3-5: Foto vrtu RE 002 Maxičky



Obr. 3-6: Pokles hladiny podzemní vody ve vrtu Re001 Sněžník v období od listopadu 2017 až po duben 2019 jasně dokumentuje projevy sucha

Vrt RE 002 Maxičky byl odvrtán bezjádrovou technologií do hloubky 102 metrů. Až do hloubky 4 metrů bylo vrtáno průměrem 245 mm, zbývající část vrtu až do hloubky 102 metrů vrtným průměrem 187 mm. Hladina podzemní vody byla naražena v hloubce 91 metrů.

Vrt by vystrojen definitivní výstrojí PVC o průměru 125 mm a síle stěny 7,5 mm se závitovými spoji až do konečné hloubky. Interval perforovaných trubek je od úrovně 60 m pod

terénem až do 99 m. Obsyp byl proveden plaveným kačírkem do hloubky 45 m. Po ověření úrovně obsypu karotážním měřením byla zbývající část mezikruží vrtu zajílována a zacementována. Na vrtu bylo zhotoveno zamykatelné zhlaví.

#### 3.3. Karotáž

Na obou vrtech byly realizovány firmou AQUATEST dva druhy karotážních měření. První bylo realizováno před definitivním vystrojení vrtu, druhé po jeho dokončení.

Cílem měření před výstrojí bylo detailně rozčlenit litologický profil, zjistit prostorový průběh vrtů (odklon od vertikály a azimut odklonu), zjistit úseky vykavernované horniny, identifikovat otevřené pukliny a zjistit základní fyzikální vlastnosti hornin.

- Před vystrojením byly použity tyto karotážní metody:
- Gama gama karotáž v hustotní modifikaci
- Kavernometrie
- Gama karotáž
- Neutron neutron karotáž
- Karotáž magnetické susceptibility
- Odporová karotáž
- Indukční karotáž
- Inklinometrie

Cílem měření po vystrojení bylo objasnit hydrodynamické poměry ve vrtech, zjistit fyzikálně chemické vlastnosti vody a jejich případnou zonalitu, ověřit přítomnost obsypu v zaplášťovém prostoru, zkontrolovat vnitřní prostor vrtu po vystrojení (umístění perforace, těsnost pažnicových spojů, napadávky na dně, cizorodé předměty ve vrtu a podobně).

Po vystrojení byly použity tyto karotážní metody:

- Televizní prohlídka vrtnou kamerou
- Citlivá termometrie
- Rezistivimetrie v aplikaci metody ředění označené kapaliny
- Rezistivimetrie v aplikaci metody konstantního čerpání označené kapaliny
- · Gama gama karotáž v hustotní modifikaci
- Kavernometrie
- Hloubkově spojité měření fyzikálně-chemických vlastností vody sondou OCEAN: konduktivita, teplota, pH, redox potenciál, procento rozpuštěného kyslíku

Na základě karotáže byl podrobně rozčleněn litologický profil. Zastiženy byly sedimenty křídového stáří v písčitém a jílovitopísčitém vývoji. Bylo použito členění hornin na základě podrobného popisu vrstevního sledu vrtu 4630B (Prostřední Žleb), situovaného v lese východně od obce Maxičky, který byl vyhlouben v rámci projektu "Rebilance podz.vod ČR" v roce 2015 (Valečka, Adamovič). Při porovnání s karotážními křivkami ve vrtu RE001 je patrné, že bylo zastiženo souvrství sedimentů, jež slabě upadá směrem k východu. Vrstvy se v obou vrtech opakují, ve vrtu RE002 jsou však počítaje od terénu o 58,5 m níže v porovnání s vrtem RE001.

Diametrálně se liší hydrodynamický režim v obou vrtech. Zatímco ve vrtu RE002 dochází jen k velmi pomalému proudění od hladiny směrem dolů (0,002 l/s), ve vrtu RE001 bylo zjištěno velmi intenzivní proudění vody, s nímž se v této oblasti setkáváme poprvé (kromě vrtu vyhloubeném na náhorní plošině Děčínského Sněžníku 4630A, ale tam se jednalo o hydraulický zkrat, jenž bylo nutno cementací zlikvidovat). Proudění napříč vrtem dosahuje rychlosti 29,5 m/den, intenzivní je i vertikální složka proudění (1,0 l/s). Proudění se přitom omezuje na hloubkový interval 66,9-85,0 m (resp. 88 m).

Fyzikálně chemické vlastnosti vody jsou v obou vrtech podobné: typická je velmi nízká hodnota pH (až 5,3), kladné hodnoty oxidačně redukčního potenciálu, konduktivita se pohybuje mezi 120-170  $\mu$ S/cm (konduktivita jednotlivých přítoků se mírně, ale přece jenom poněkud liší). Teplota u dna je ve vrtu RE001 zhruba o 1°C nižší než ve vrtu RE002. Je to způsobeno tím, že ve vrtu RE001 je teplota ovlivněna prouděním relativně chladné vody. Teplota ve vrtu RE002 tak spíše odpovídá přirozené teplotě horninového masivu neporušené cirkulací podzemních vod.

Velmi zajímavý je průběh křivek rozpuštěného kyslíku. Ve vrtu RE001- v úseku, kde dochází k intenzivní cirkulaci podzemních vod, bylo zaznamenáno vysoké procento rozpuštěného kyslíku. Jedná se tedy o vodu s relativně krátkou dobou zdržení v horninovém masivu. Ve vrtu RE002 – v krátkém úseku pod hladinou (ta je ve vrtu RE002 hluboko zakleslá), kde dochází k pomalému proudění, je procento rozpuštěného kyslíku mírně zvýšené. Domníváme se proto, že přítok pochází z jedné z puklin výše nad hladinou, kde je voda okysličená. V hloubce přes 90 m při velmi pomalém proudění si totiž zvýšený obsah kyslíku lze jen těžko vysvětlit jinak.

Bylo zjištěno, že oba vrty jsou po stránce technického provedení v pořádku. Obsyp se v obou vrtech nachází v celém úseku perforovaných pažnic a ještě v části úseku plných pažnic. Perforace je funkční, perforační otvory ani pažnicové spoje nejsou nikde poškozené. Oba vrty se jen mírně odklánějí od svislice.





Obr. 3-8: Geologické výsledky karotážního měření na vrtu RE001 Sněžník

AQUATEST a.s. Praha divize karotáže add								gd3				
Výsledky kardtážních měření – litelogie PE001 Spěžník												
v y		1						1 01	ICZ	шк		
₽ Pka	karot pro	fil		2		Přiro	ozená ra	dioaktiv	rita [uR/ho	od]		27
루트	nui eupi e		Schematizovaný popis	<u>17</u>		Ind	ukční ka	rotáž L	50 [cpmE	3]		5
<u> </u>	-0.0 GR 30	p.o	-									
1		Q51	3 0.0-1.0 : kvatér perozlišený				_	4				
-		T15	1.0-2.5 : Pískovec illovitý	1						3		
4 -		T14	2.5-4.0 : Pískovec slabě iílovitý									
_		T16	4.0-5.9 : Pískovec prachovitý								$\geq$	-
	<u></u>	- T15 - T16	5.9-6.6 : Pískovec jílovitý	1				<	$\leq$	$\sim$		
- 00		T15	6.6-7.7 : Pískovec prachovitý	1			'		5		, '	-
-		T15	7.7-8.8 : Pískovec jílovitý	1					5			-
2-	·····	116	8.8-9.9 : Pískovec prachovitý	8	x		1	1			\'	-
-	••••••	T12	10.5 : Piskovec Jilovity		$\langle \rangle$							-
- 9		112	11 8-16 9 : Pískovec střednězmný		.)							
_		T14	16.9-17.4 : Pískovec slabě illovitý	1	~	>						
0	••••••••		17.4-18.3 : Pískovec jílovitý	1 (								
N.	ter and		18.3-26.8 : Pískovec střednězrnný	17								
-	<mark>-lettera</mark> (* 1816)	T12			{							-
- 24					<u>č</u> –	н. н. Н			1			
-	••••••••••••••••••••••••••••••••••••••				(							-
- 28		T14	26.8-27.6 : Pískovec slabě jílovitý	1	~				1			
_	<mark>nanana</mark> kara kara		27.6-38.3 : Pískovec střednězrnný		>							
N	·····			1 5								
ю –		T12			, ,						ľ	-
-	<mark>eterete</mark> a la la la la			(	2							
36					ζ.	1 I I	1	1	1		2	-
-				4	$\sum$							-
<del>유</del> -		. 114 .	38.3-39.3 : Pískovec slabě jílovitý	1	. <u> </u>							
٦ -			39.3-68.5 : Piskovec strednezrnny		2							
4 -					$\geq$							
· _					- X							
	<mark>ran ana</mark> ana amin'ny tanàna mandritra dia kaominina dia kaominina dia kaominina dia kaominina dia kaominina dia				5							
4 -	•••••				5							-
-	<mark> </mark>				5							-
- 52					3	н. н. Н			1		•	-
-	••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	T12			5							
- 29	<b></b>				5							-
	<mark></mark>				5							
0					5							
ര					>							
-	<mark>letteriette</mark> n ander ander				5							-
- 8					<u>`</u>	· · ·	1	1	1		1.	-
-	<mark></mark> e e e e			$\leq$	)						(	
8 -	•••••			<	2					. )		
-	· - · · ·	T14	68.5-69.5 : Pískovec slabě jílovitý		$\geq$					5		
2 -		112	69.5-71.3 : Pískovec střednězrnný	1	~					. /.		
~		T14	/1.3-/3.3 : Piskovec slabě jilovitý	-	2	~				(		
-		T15	73.3-74.8 : Pískovec jílovitý	-		2				)		-
- 76			74.8-81.7 : Piskovec slabe jilovity		' (	· ·	1	1	1	') '		-
	<u></u>	T14			<	5				$\leq$		-
<u>ଚ୍ଚ</u> -	<b>2-1-1-2-1</b> (1-1-1)				·	Ś						
		T15	91 7 92 9 · Díakovos illovitý	-		~~						
28 -		T14	82.8-85.1 : Pískovec slabě iílovitý	1		$\leq$			. >			
_		T15	85 1-86 4 · Pískovec illovitý	1				~				
- -	· · · · · ·		86.4-93.8 : Pískovec prachovitý	1			5	· .				]
æ -	······································		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1	1		Ŕ		1		'	1
-		T16		1			2	L L				
92				1	1		5	2	1		'	-
-			93 8-96 3 · Prachovec nísčitý	1	_			~				-
96 -	······································	T33		1	$\leq$				1	З.		-
-	<b></b>	116 T33	96.3-96.9 : Pískovec prachovitý	1-								
			96.9-97.9 : Prachovec písčitý	1								



Obr. 3-9: Hydrogeologické výsledky karotážního měření na vrtu RE002 Maxičky

#### 3.4. Měření průtoků

Hydrogeologické poměry mohou být upřesněné charakterizací povrchových vodotečí. Kolektory podzemních vod jsou většinou propojeny s potoky a řekami v daném území, do kterých se podzemní vody odvodňují, nebo se z nich naopak doplňují břehovou infiltrací. Platí, že pokud je hladina podzemní vody v kolektoru vyšší než hladina ve vodoteči, dochází k odvodnění kolektoru a pokud je hladina podzemní vody nižší, dochází k dotaci kolektoru.

Odvodnění kolektoru lze specifikovat jako základní odtok vodoteče. Jde o průtok v období bez srážek, kdy ve vodoteči už není voda pocházející z povrchového odtoku, ale pouze voda pocházející z podzemního odtoku z okolního kolektoru. Pokud základní odtok (průtok v období bez srážek) změříme na několika profilech podél vodoteče, zjistíme intenzitu odvodnění nebo dotace kolektoru pro každý úsek mezi dvěma měřeními. Takové měření nazýváme postupné podélné profilování (PPP). Tímto způsobem můžeme poměrně přesně určit přítoky a odtoky z dané hydrogeologické struktury.

Pro model v oblasti Hřenska je zásadní řeka Kamenice, na které byla metoda PPP aplikovaná už několikrát v minulosti, například v roce 2013 v rámci řešení projektu Rebilance zásob podzemních vod. Podle výsledků je dolní tok Kamenice od Dolní Kamenice do Hřenska příronový. Celkové odvodnění podzemní vody z turonského kolektoru v tomto úseku je asi 900 l/s (50 l/s na kilometr toku).

V rámci projektu ResiBil jsme se soustředili na profilování přeshraničních potoků na levém břehu Labe, kde se PPP ve větším rozsahu v minulosti neprovádělo. Profilování probíhalo v červenci a v srpnu roku 2018, kdy celý region sužovalo sucho a povrchový odtok byl Obr. 3-10: Geologické výsledky karotážního měření na vrtu RE002 Maxičky

AQUATEST a.s. Praha divize karotáže gd3						
Výsledky karotážních měření- litologie RE002 Maxičky						
ka	korot pro	<b>.</b>		0 Přirozená radioaktivita [uR/hod] 50		
l du [			Schematizovaný popis	18 Indukční karotáž L50 [cpmE3] 3		
-	-0.0 GR 6	iQ.0				
1	2	Q12	3	4		
-		T14	0.7-2.5 : Pískovec slabě illovitý			
4 .	••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	T12	2.5-3.8 : Pískovec střednězrnný			
		T12	3.8-4.6 : Pískovec jílovitý			
		T12	4.6-5.6 : Pískovec střednězrnný			
	<u> </u>	T33	5.6-6.3 : Pískovec slabě jílovitý			
	······	Т33	6.3-7.3 : Piskovec střednězrnný			
₽ ·	·····	† .	7.3-7.6 : Piskovec slabe jilovity			
-		T12	8.2-9.0 : Prachovec písčitý			
9.		T15	9.0-9.8 : Pískovec jílovitý			
			9.8-11.9 : Prachovec písčitý			
0		T15	11.9-15.1 : Pískovec střednězrnný			
		T26	15.1-17.8 : Pískovec jílovitý			
		T15.	17.8-18.8 : Prachovec písčitý			
- 24		T33	10.5.21.5 : Piskovec jilovity	/		
-	<u></u>	155	21.5-22.3 : Pískovec i/lovitý			
- 58		т14	22.3-27.6 : Prachovec písčitý			
		T15 T12	27.6-28.2 : Pískovec slabě jílovitý			
g .		T14 T12	28.2-29.6 : Pískovec jílovitý			
	·····	T33	29.6-30.6 : Pískovec střednězrnný			
		T33	30.6-31.1 : Pískovec slabě jílovitý			
98 -		T33	31.1-31.9 : Piskovec střednězrnný			
. ·		T12	32 2-32 8 : Pískovec stědnězroný			
14	<mark></mark>	T12	32.8-33.9 : Prachovec písčitý			
· ·		- · · -	33.9-34.2 : Pískovec jílovitý			
4.		T15	34.2-35.0 : Prachovec písčitý			
		ļ .	35.0-35.4 : Pískovec jílovitý			
	<u></u>	T12	35.4-36.8 : Prachovec písčitý			
4.		T15	36.8-38.5 : Piskovec strednezrnny			
		+ .	39 3-41 8 : Pískovec střednězrnný			
- 52		Т33	41.8-45.8 : Pískovec jílovitý			
		T14	45.8-47.3 : Pískovec střednězrnný			
- 29	ter	T12	47.3-50.7 : Pískovec jílovitý			
		T15	50.7-54.0 : Prachovec písčitý			
0		T15	54.0-55.0 : Pískovec slabě jilovitý	<u> </u>		
0		- · ·	57.0.58.0 : Piskovec strednezrnny			
		T14.	58.0-58.7 : Pískovec slabě illovitý			
- <u>8</u> -	2-2-1-2-2-1-1-1	T15	58.7-61.5 : Pískovec jílovitý			
-		F T26	61.5-62.7 : Pískovec slabě jílovitý			
89 -	<b>2</b> 02020	T14	62.7-66.8 : Pískovec jílovitý	1 5		
-		T15	66.8-67.0 : Pískovec železitý			
<u>د</u> 2	<mark></mark>		67.0-69.2 : Piskovec slabe jilovity	(		
	<mark></mark>		109.2-70.2 : Piskovec střednězroný			
9						
~ `		T12				
l _ '						
00						
-		÷ .		/ ·		
2.		T14 T12	82.3-83.6 : Pískovec slabě jílovitý			
.		T14	03.0-04.8 : PISKOVEC Streanezrnny			
- 92		T12	85.8-86.8 : Pískovec střednězrnný			
	<mark></mark>		86.8-87.5 : Pískovec slabě jílovitý	5		
			87.5-101.3 : Pískovec střednězrnný			
95						
·		T12		5		
96				{· · · · · · · · · · · ·		
19				·		
·		1				

zanedbatelný. Průtok byl na vybraných místech stanoven metodou hydrometrování. Změřeny byly potoky pramenící na Děčínském Sněžníku, které odtékají směrem na sever do Labe a dle předpokladů odvodňují většinu turonského kolektoru severně od krušnohorského zlomového pásma.

Výsledky lze nejlépe dokumentovat na toku Biela (v ČR Ostrovská Bělá). Průtok byl změřen na 6 profilech od nejvyššího u státní hranice po nejnižší v Königsteinu asi 1,5 km od ústí do Labe. Na prvním profilu bylo naměřeno 13 l/s a na posledním profilu 275 l/s. Změřeny byly dva přítoky Bielbach (2 l/s) a Cunnersdorferbach (122 l/s). Na celém měřeném úseku potoka byl zaznamenán celkový příron 138 l/s. Poslední 2 km úsek je podle měření mírně ztrátový (-19 l/s). Velmi výrazné jsou přírony na 2 km úseku mezi profily Ottomühle (20 l/s) a Schweizermühle (113 l/s), kde se průtok zvýší o 93 l/s. Tento jev lze vysvětlit srovnáním nadmořské výšky terénu, respektive odvodnění a úrovně báze kolektoru BC, dle podkladů poskytnutých ČGS. Báze BC se v těchto místech nachází pouze několik metrů pod terénem.

Dalším příkladem je měření na toku Cunnersdorferbach (v ČR Liščí a Sporný potok). Průtok byl ověřen na 6 profilech. Na 4 profilech proběhlo hydrometrování, získán byl údaj o průtoku na profilu Cunnersdorf 1



(48 l/s), sledovaném saským zemským úřadem a byl ověřen nulový průtok na profilu pod Liščím jezerem na státních hranicích. Změřen byl i přítok Lampertsbach (6 l/s). Na celém měřeném úseku potoka byl zaznamenán celkový příron 181 l/s. V období sucha dochází zřejmě k prvním příronům asi 2 km jižně od obce Cunnersdorf v údolí pod vrcholy Rotstein a Katzstein, kde byly zmapovány četné prameny. Z této oblasti pochází veškerý průtok změřený na nejvyšším hydrometrovaném profilu v obci Cunnersdorf (28 l/s). Nejvyšší přírony byly zaznamenány ve spodní části toku, v úseku od ústí do asi 3,5 km vzdálenosti proti proudu potoka, kde byl změřen příron ve výší 148 l/s.

Konečně jako třetí ukázka tohoto postupu je měření na toku Krippenbach (v ČR Napajedla). Průtok byl změřen na 3 profilech od nejvyššího u státní hranice (Králův mlýn 8 l/s) po nejnižší v Krippenu (102 l/s) asi 700 m od ústí do Labe. Na celém měřeném úseku potoka dlouhém asi 9 km byl zaznamenán celkový příron 94 l/s.

Podle výsledků všechny 3 hlavní vodoteče v oblasti Děčínského Sněžníku drénují celkově okolo 400 l/s. Při ploše odvodnění okolo 136 km<sup>2</sup> to znamená specifický odtok 3 l/s/km<sup>2</sup>. Byly

Obr. 3-11: Nejnižší měřený profil na potoku Biela 1700 m od ústí do Labe s průtokem 275 l/s



identifikovány úseky s intenzivnější drenáží podzemní vody do vodotečí. Na základě těchto poznatků byly zpřesněny mapy hladiny podzemní vody, pomocí kterých se kalibroval numerický model proudění podzemní vody. Ověřena byla i funkce okrajových podmínek typu řeka v numerickém modelu.

Říční síť v oblasti Lückendorf se vyznačuje drobnými řekami a potoky. Hodnoty průtoku v těchto vodních tocích nejsou k dispozici, protože limnigrafické stanice saské měřící sítě leží mimo modelové území. Tyto limnigrafické stanice navíc zaznamenávají pouze hydrologická data vodotečí, do nichž vody z pilotního území ústí. Data získaná v těchto profilech limnigrafických stanic nelze regionalizovat pro použití v rámci projektu.

Pro sestavení modelu proudění podzemní vody jsou potřebné hodnoty průtoku, pomocí kterých je možné sestavený model co možná nejpřesněji kalibrovat. Z těchto důvodů bylo nutné provést měření průtoků, které mělo poskytnout obrázek o hydrologické situaci v oblasti Lückendorfu.

Ve spolupráci se státní společností pro životní prostředí a zemědělství Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) byla provedena čtyři sezónní měření na šesti vybraných vodních tocích v oblasti Lückendorf. Místa, na kterých tato měření probíhala, jsou vyznačena na obr. 3-13. Určení průtoku bylo provedeno měřením rychlosti proudění vody hydrometrováním. Pro volbu místa, na kterém měření probíhalo, byly důležité následující podmínky:

- měřená lokalita se nachází jižně od Lužické poruchy,
- z velké části se jedná o rovný úsek vodního toku, se stálým spádem a pokud možno se stejným průřezem profilu za účelem zajištění laminárních vlastností průtoku,
- bez zadržování vody, nezarůstající vodní tok.

Pro vodní toky na české straně v jižní části modelového území nebyly rovněž dostupné údaje z limnigrafických stanic. Měření průtoku, která byla prováděna na německé straně, nebylo možno na českém území provést. Z tohoto důvodu byl proveden pouze jednorázový odhad průtoku na šesti místech (viz obr. 3-13).

Na německé straně se průtoky pohybovaly v rozpětí mezi 1,54 l/s a 20,8 l/s, na české straně pak mezi 47,7 l/s a 332,0 l/s. Naměřených hodnot průtoku bylo následně možno použít ke kalibraci modelu proudění podzemní vody.



Obr. 3-13: Místa provedených sezónních měření v modelovém území Lužické hory

#### 3.5. Evidence pramenních vývěrů

Pramen je vývěr podzemní vody na povrch. Evidence a měření pramenů patří mezi základní možnosti získání hydrogeologických informací v terénu. Prameny poskytují důležité údaje o stavu a změnách hydrogeologického prostředí. Pramenů existuje v daném území početně podstatně více než využitelných hydrogeologických vrtů.



Pro modelová řešení indikují prameny místa či linie odvodňování jednotlivých kolektorů, ale zejména mohou být podkladem k přesnějšímu vymezení izolátorů a poloizolátorů. Prameny mohou upozornit i na některé jinak hůře podchytitelné jevy, jakými je třeba detailní stratifikace kolektorů.

Vydatnost pramenů může citlivě reagovat na změny prostředí. Často je ale obtížné zjistit, který typ změny prostředí danou výchylku ve vydatnosti vyvolal. Nevýhodou sledování vydatnosti pramenů oproti sledování úrovně hladin podzemních vod ve vrtech je především větší množství vlivů, které na prameny mohou působit. Zásadní je typ pramenného vývěru - typ podchycení pramene a stav jeho údržby může mít značný vliv na jeho vydatnost. Prameny jsou často bezprostředně závislé na srážkové činnosti. Někdy i malý pokles úrovně hladiny podzemní vody může znamenat silný pokles vydatnosti pramene. Na vydatnost pramenů může mít z antropogenních vlivů zásadní vliv čerpání podzemních vod, drenáž podzemních vod, propojení kolektorů vrtnými pracemi nebo liniovými stavbami (drenáže, kanalizace, výkopy pro vodovody, plynovody či další sítě), kterými může docházet k porušení izolátorů a odvedení vody podzemním odtokem. K zániku pramenů může docházet jak cíleně, tak nechtěně. Negativní vliv na vy-

Obr. 3-14: Upravený pramen, sledovaný ČHMÚ v oblasti Děčínský Sněžník datnost pramenů mohou mít také změny ve využití pozemků v infiltrační oblasti, například vytváření nepropustných ploch.

Do určité míry specifický pro danou oblast je výskyt pramenů ze svrchních kolektorů, které se často na velmi krátké vzdálenosti vsakují zpět do podloží. Tento vsak indikuje výskyt silně propustných kolektorů s hladinou podzemní vody hlouběji pod povrchem.

Základním podkladem pro další práce bylo provedení rešerše odborných materiálů k dané problematice. V rámci českého území byly adekvátní informace nalezeny především v archivu VÚV TGM, v. v. i., archivu ČGS (Geofond), jednotlivých odborných mapách a v menší míře i v dalších zdrojích informací. Zajímavým informačním zdrojem o lokalizaci pramenů byl například i internetový portál estudanky.eu, ve kterém jsou celostátně amatérsky podchyceny některé prameny a další zdroje podzemní vody.

U všech nalezených pramenů byla měřena vydatnost, konduktivita vody, aktuální teplota vody a vzduchu.

Vydatnost pramenů a pramenných oblastí byla měřena v naprosté většině metodou odměrné nádoby, pouze výjimečně bylo použito měření pomocí vodoměrných vrtulí, případně ve výjimečných případech v nouzi i odborného odhadu (například v terénu nepřístupný odtok pramene). Pokud nebyl v blízkosti pramene či měřeného profilu vhodný objekt k měření přímo do nádoby (měrný přepad, propustek cesty či silnice, pramen vyvedený trubkou apod.), byl takovýto měrný objekt v terénu pro potřeby měření vytvořen pomocí přenosné trubky vhodného průměru. Měření v terénu pak probíhalo za pomoci kalibrované nádoby vhodného objemu a stopek. Měření vydatnosti na jednom bodě bylo standardně prováděno třikrát za sebou, ze získaných hodnot byla vypočtena průměrná hodnota. Každý pramen a profil byl v terénu zaměřen přístrojem GPS. Veškeré prameny byly fotograficky zdokumentovány.

Vzhledem k prioritnímu zaměření průzkumu a evidence pramenů pro potřeby modelových řešení byly v první fázi prací plošně vyhledávány především prameny v české části zájmové oblasti Děčínského Sněžníku. Následně byla provedena doplňková vyhledávání a měření i v oblastech Hřensko-Křinice a Lückendorf (Lužické hory). Zde se terénní práce soustředily především na lokality rozšíření zájmových území oproti předchozímu projektu GRACE a na ověření polohy a vydatnosti významných pramenů.

Část významnějších pramenů je jímána pro potřeby zásobování obyvatel pitnou vodou. V oblasti Dě-

čínského Sněžníku se jedná například o větší množství vydatných pramenů pro zásobování města Děčín (například Studený pramen, podchycené prameny v údolí Bělského potoka apod.). V oblasti Hřenska jsou podchyceny například dva prameny v jímacím území Hřensko a část pramene Ilmenquelle ve Schmilce.

Obr. 3-15: Přírodní pramenný vývěr měřený v oblasti Děčínského Sněžníku

Obr. 3-16: Lokalizace změřených pramenů v oblasti Děčínského Sněžníku



JÍLOVÉ



NOVEMERTO

DÉCÍN.

DECI

Pomocí evidence a měření pramenů se podařilo vymezit a upřesnit důležité hydrogeologické struktury pro modelová řešení. Jednalo se například o polohy jednotlivých izolátorů, jako bazální křídový izolátor a izolátor A/BC v části oblastí Děčínský Sněžník a Hřensko/Křinice. V oblasti Hřensko/Křinice byl pomocí pramenních vývěrů dále upřesněn rozsah (polo) izolátoru 2/3 respektive rozhraní kolektorů 2 a 3 v sedimentech turonu. V zájmové oblasti Lückendorf (Lužické hory) bylo možno na základě pramenních vývěrů mimo jiné částečně vymezit průběh izolátoru BC/D.

### 4 Matematické modelování

Základem hydrogeologického modelu je konceptuální model, který vymezuje prostorovou charakteristiku zájmového území, to jest tvary kolektorů a izolátorů a funkci jejich případného tektonického porušení. Konceptuální model vychází z nejnovějších geologických poznatků a na základě těchto dat navrhne ve schematizované podobě hydrogeologické fungování dané struktury. Návazný hydraulický model tyto funkční vztahy definuje matematicky. Další vstupní parametry dodá hydrologický model, který zpracuje a matematickým způsobem vyjádří klimatická data a jejich interakci se složkami povrchového odtoku.

Návazný hydrogeologický model umožní prostorovou vizualizaci proudění podzemní vody, výpočet vodní bilance území, prognózu využitelných zásob podzemních vod a predikci chování hydrodynamického systému v reakci na předpokládané antropogenní zásahy či změny přírodních podmínek (např. vliv sucha včetně výpočtu různých scénářů a variant.

#### 4.1 Hydrologické bilanční modelování

#### 4.1.1. Modelování vodní bilance v oblasti Děčínského Sněžníku a Křinice

Infiltrace srážek a doplňování kolektorů je vyhodnoceno pomocí hydrologického modelu BI-LAN, který simuluje složky vodní bilance v daném povodí. Model byl vyvinut ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, v. v. i. a byl popsán v publikaci Tallaksen a van Lannen (2004). V posledním desetiletí byl tento nástroj nadále vyvíjen a poskytl spolehlivé výsledky v místních poměrech (Vizina et al. 2015, Hanel et al. 2012, Horáček et al. 2008). Struktura modelu vychází ze systému rovnic, které popisují vodní bilanci.

Hydrologický model je zpracovaný pro jednotlivá povodí, která jsou vymezená podle dostupných časových řad průtoků. Pro vybrané profily jsou pomocí digitálního modelu terénu vymezené plochy příslušných povodí. Následně jsou pro každé povodí připravené časové řady srážek a teplot. Hodnoty reprezentativní pro jednotlivá povodí jsou výsledkem interpolace hodnot z meteorologických stanic v povodí nebo v jeho okolí. Na obrázku 4-1 je znázorněné rozmístění meteorologických stanic v zájmovém území.

Vstupní soubor pro model BILAN zahrnuje srážky, teploty a průtoky. Údaj o teplotě vzduchu slouží jako indikátor energetických podmínek, které zásadně ovlivňují vodní bilanci. Časový krok modelu je 1 měsíc. Model simuluje přetoky a množství vody ve sněhové pokrývce, v nenasycené zóně a v kolektoru podzemních vod. Procesy jsou řízeny šesti parametry:

- · Koeficient pro výpočet množství kapalné vody dostupné na povrchu za zimních podmínek
- Parametr vztahu mezi srážkou a odtokem (přímý odtok)
- Parametr rozdělující perkolaci na hypotermický odtok a na dotaci podzemní vody pro letní podmínky

- Parametr rozdělující perkolaci na hypotermický odtok a na dotaci podzemní vody pro podmínky tání sněhu
- Parametr rozdělující perkolaci na hypotermický odtok a na dotaci podzemní vody pro zimní podmínky
- Parametr určující odtok ze zásoby podzemní vody (základní odtok)

Kalibrace parametrů probíhá statistickým srovnáním pozorované a simulované řady odtoku pomoci kritéria MAPE (střední absolutní procentuální chyba). Parametry jsou nastavené tak, aby byla dosažena nejlepší shoda mezi pozorováním a modelovou simulací. Hlavními výstupy hydrologického BILAN modelu jsou časové řady potenciální a reálné evapotranspirace, půdní infiltrace a doplňování podzemních vod v nasycené zóně. Výsledky jsou platné vždy pro jednotlivá povodí a jsou následně přepočítány na celou oblast hydrogeologického modelu podle plošných poměrů.

Pro povodí Křinice a potoka Biela byla provedena kalibrace pro celé období pozorování 1961–2017, respektive 1964–2017. Pro povodí Cunnersdorferbach byla vzhledem ke kvalitě vstupních dat, zvolena kalibrační perioda na období 1990-2010, které se jeví jako konzistentní. Stejné období bylo použito ke kalibraci i v případě povodí Kamenice. Samotný model pro povodí Kamenice byl kalibrován s důrazem na zachování ročního průměrného množství odtoku z krajiny. S ohledem na modelovanou lokalitu a velkou dotaci průtoku z podzemních vod, byla provedena separace základního odtoku, kterému byla dána v rámci kalibrace významná role.

Pro obě modelové oblasti Děčínský Sněžník i Hřensko/Křinice byly zpracovány dvě povodí. Následně byly pro obě oblasti vypočteny relevantní časové řady doplňování podzemních vod jako vážený průměr hodnot z dvojice hodnocených povodí.



Obr. 4-1: Mapová projekce vstupních dat do modelu BILAN

#### 4.1.2. Modelování vodní bilance v oblasti Lückendorf

Vyhodnocení hydrologické bilance v oblasti Lückendorf probíhalo na podobných principech. Základem pro sledování prostorového a časového vývoje zásob podzemní vody je přesné vyhodnocení bilance transportních procesů a procesů výparu a transpirace vegetačním pokryvem na a uvnitř půdního tělesa. Kromě hydrologických veličin jako jsou srážky, výpar a odtok představuje rozhodující veličinu pro zjištění zásob podzemní vody míra tvorby nové podzemní vody. Míry doplňování podzemní vody, použité pro dílčí území Lückendorf, byly definovány pomocí hydrologického modelu ArcEGMO a zpřístupněny prostřednictvím hydrologického portálu Svobodného státu Sasko. Konstrukce modelu včetně parametrizace

území, kalibrace a validace použití modelu, proběhla v rámci kooperačního projektu **KLiWES**, který je od roku 2008 řešen Saským zemským úřadem pro životní prostředí, zemědělství a geologii (LfULG) a Technickou univerzitou v Drážďanech.

ArcEGMO je variabilní, hydraulický srážkoodtokový model, který pomocí zapojení jednotlivých modulů, umožňuje popsat dílčí hydrologické procesy. Propojením dílčích procesů lze řešit specifické otázky, výstupy lze vydávat ve variabilním prostorovém a časovém rozlišení. Druh a dostupnost výchozích dat přitom podmiňují přesnost modelování. Pro popis dílčích modulů jsou používány moduly vycházející z fyzikálně odůvodněných koncepčních modelovacích přístupů. Přehled klíčových procesů programu a jednotlivé úrovně modelování (například klimatická a hydrologická data pro dílčí území Lückendorf) je uveden na následujícím obrázku. vertikální procesy Meteorologie Vytváření odtoku ve vegetaci a v půdě Průtok Průtok Podzemní voda

ArcEGMO potřebuje pro modelování vstupní data, která jsou poskytovaná podle druhu buď jako časové řady, nebo jako prostorové informace. Pro výstup vypočtených dat lze navolit časovou agregaci hodinových hodnot až po celkový časový rámec několika let. Pro statistické vyhodnocení lze navíc analyzovat výstup modelu a nechat jej zvolenou časovou agregaci vydat jako statistickou veličinu (suma, střední hodnota, minimum, maximum). Hydrologické veličiny pro dílčí území Lückendorf byly vydány jako sumarizované střední hodnoty za každý měsíc sledovaného časového období.

Pro územní znázornění výsledků nabízí ArcEGMO možnost vydání prostorově navázaných dat. Tato data lze následně navzájem propojit v geografickém informačním systému (například ArcGIS) a vizualizovat. Kromě toho lze data vydávat prostorově agregovaná. Možné jsou následující územní jednotky: úseky vodotečí, elementární plochy, hydrotopy, dílčí povodí, regiony a celé území. Pro dílčí území Lückendorf byl výpočet proveden na úrovni dílčích povodí, jak je uvedeno na obr. 4-3.

Modelová simulace pro dílčí území Lückendorf probíhala ve třech fázích: V rámci prvního kroku proběhla inicializace. Během této fáze byl vygenerován hydrologický model Lückendorf. Přitom byla načtena veškerá prostorová, případně časová data a pomocí vzájemných vazeb propojena do geologického datového modelu. Pro kalibraci a validaci odtoků v modelu byla použita dostupná data ze saských limnigrafických stanic z let 1951- 2005. Pro doplnění Obr. 4-2: Schéma modelu ArcEGMO Obr. 4-3: Dílčí povodí v dílčím území Lückendorf, definovaná hydrologickým portálem (zeleně) a nově vytvořená (žlutě)



těchto dat byly prodlouženy datové řady až do roku 2010. První krok dále zahrnoval inicializaci jednotlivých úrovní modelu a vyhodnocení výsledků na úrovni hydrotopů. Druhá fáze pak zahrnovala vlastní řešení modelu. Za tímto účelem byla výchozí meteorologická data přenesena na odtokový model a následně krok za krokem zpracovávána navazujícími moduly. Po ukončení simulace byly na základě prostorové agregace pro dílčí povodí modelového území Lückendorf vyhodnoceny výsledky. Pro zajištění dalšího bezproblémového zpracování byly všechny výsledky uloženy ve formátu ASCII.

Data poskytována Hydrologickým portálem Saska pro dílčí území Lückendorf byla analyzována a odpovídajícím způsobem upravena. Detailní popis kritérií a datových podkladů pro hydrologické výpočty v rámci projektu KLiWES se nacházejí v publikační řadě LfULG (2011). Část modelového území včetně povodí, která jsou v hydrologickém modelu k dispozici, zahrnuje rovněž území České republiky. Proto bylo nutno pro území bez dostupných hydrologických dat provést manuální úpravu. Nejprve byla provedena identifikace těchto částí území. Celé území bylo rozděleno podle kritérií topografie, říční síť a svažitost do nových dílčích povodí (obr. 4-1). Na základě analýz sousedních dílčích povodí a podobností byly těmto nově vytvořeným dílčím povodím přidělena míra tvorby nové podzemní vody relativně podle na ně navazujících dílčích povodí.

#### 4.2. Konceptuální modely

Konceptuální model je posledním krokem před tvorbou samotného hydraulického numerického modelu. Představuje interpretaci hydrogeologických a souvisejících geologických, geomorfologických, hydrochemických a klimatických poměrů hydrogeologického celku, směrů proudění, vyjasnění míst infiltrace a drenáže a to včetně stanovení okrajových podmínek.

#### 4.2.1. Všeobecné hydrogeologické podmínky

Kolektory v zájmovém území tvoří obecně pískovce, zatímco ostatní litologické typy s větším podílem jílu a prachu tvoří izolátory. Hydrogeologický konceptuální model území rozlišuje 4 oddělené kolektory s tím, že v některých modelových částech se nemusí všechny zmíněné kolektory vyskytovat.:

- Kolektor 4, nebo kolektor A je nejhlubší cenomanský kolektor, který tvoří střídající se polohy pískovce, slepence a prachovitého až jílovitého pískovce. Mocnost dosahuje až 80 m na Děčínském Sněžníku a až 140 m u lužické poruchy na severu zájmového území.
- Kolektor 3 neboli hlavní kolektor B s nejvýznamnějšími odběry podzemní vody v oblasti tvoří
  pískovce až prachovité a slinité pískovce. Izolátor mezi kolektory 3 a 2 (3/2) je lépe definován na severu v Saské části v povodí Křinice. V centrální části zájmového území izolátor
  postupně ztrácí svoji funkci. Jižně od toku řeky Kamenice a v oblasti Děčínského Sněžníku
  je funkce izolátoru 3/2 omezena a nelze ji adekvátně definovat. Proto v těchto částech konceptuální model předpokládá spojený kolektor 2+3 (BC). Jeho mocnost dosahuje až 230 m.
- Kolektor 2, nebo kolektor C vzniká ve středně turonských pískovcích. Lze ho vymezit v severozápadní časti oblasti Hřensko/Křinice nad izolátorem 3/2.
- Kolektor 1 představuje menší nesouvislé výskyty, které nelze definovat dostatečně přesně. Na většině modelové oblasti jsou horní 3 kolektory modelované jako kombinované.

#### 4.2.2. Klimatické podmínky

Základem pro kalibraci a validaci hydrologických modelů BILAN a ArcEGMO jsou aktuální klimatické datové řady. Klimatické podklady vycházejí z dat Německé meteorologické služby (Deutscher Wetterdienst (DWD)). Datové řady tvoří základ pro dvě použité sady klimatických dat: *základní sada klimatických dat* (SCHWARZE et al. 2013) a *referenční sada klimatických dat Saska* (BERNHOFER et al. 2019).

Základní datová sada byla zpracována v rámci projektu KliWeS Technickou univerzitou v Drážďanech a Saským zemským úřadem pro životní prostředí, zemědělství a geologii (LfULG). Referenční datová sada představuje aktualizaci základní datové sady. Pro tyto účely byla data Německé meteorologické služby opětovně ověřena z hlediska jejich konzistentnosti, chybějící části v datových řadách byly doplněny a byly zohledněny úpravy geodetických výškových závislostí. Obě datové sady byly vytvořeny prostřednictvím internetového nástroje *RaKliDa* (rastrová klimatická data). Liší se z hlediska použité metody regionalizace. Obě datové sady jsou dostupné prostřednictvím *Regionálního klimatického informačního systému pro Sasko, Sasko-Anhaltsko a Durynsko* (*Regionales Klima-Informationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen* (ReKIS)). Pro další informace o příslušném postupu odkazujeme na literaturu (SCHWARZE et al. 2013; BERNHOFER et al. 2019).

Z obou sad klimatických dat byly v projektu ResiBil zohledněny tyto klimatické prvky:

- maximální denní teplota ve výšce 2 m
- střední denní teplota ve výšce 2 m
- denní minimální teplota ve výšce 2 m
- korekce množství srážek (RICHTER 1995)
- relativní vlhkost vzduchu
- délka slunečního svitu
- globální záření
- rychlost větru ve výšce 2 m

#### Klimatické prvky v modelu BILAN

Hydrologický režim pro dílčí území Děčínský Sněžník a Křinice-Hřensko byl modelován pomocí modelu BILAN (kapitola 4.1). Jako podklad pro kalibraci a validaci zde slouží referenční sada klimatických dat. Ta zahrnuje časové řady klimatických prvků v závislosti na příslušném období měření každé stanice za roky 1951–2015, které byly pro účely výzkumu doplněny o data Německé meteorologické služby za roky 2016 a 2017. Model BILAN představuje bilanční model, který pro definování vodního režimu používá pouze klimatické prvky srážky a teplota. Další klimatické prvky nejsou touto metodou zohledňovány.

Zohlednění možných budoucích klimatických změn pro dílčí území Děčínský Sněžník a Křinice-Hřensko bylo provedeno odpovídající adaptací míry tvorby nové podzemní vody (infiltrace) v oblastech, jak je uvedeno a vysvětleno v kapitole 4.4.1.

#### Klimatické prvky v modelu ArcEGMO

Pro dílčí území Lückendorf byl hydrologický režim modelován pomocí modelu ArcEGMO (kapitola 4.1). Jako základ pro kalibraci modelu byla použita základní řada klimatických dat. Ta zahrnuje časové řady klimatických prvků v závislosti na příslušném období měření každé stanice za roky 1961–2010, které byly pro účely výzkumu doplněny o data Německé meteorologické služby za roky 2011 a 2019.

Pro dílčí území Lückendorf byly pomocí aplikace klimatických scénářů zohledněny potenciální změny klimatu, použité jako základ pro model ArcEGMO v rámci modelu KliWeS. Tyto projekce klimatu slouží pro zachycení možných změn vodního režimu saských povodí vlivem měnících se klimatických podmínek a využití krajiny. Výsledky výzkumů, prováděných v rámci projektu KLiWES, byly získány prostřednictvím *Hydrologického portálu Saska (Wasserhaushaltsportal Sachsen)*. Tyto výsledky byly pro účely projektu ResiBil převzaty a použity jako podklad pro numerické modelování proudění. Veškeré podklady a metodické kroky při řešení scénářů jsou detailně popsány v publikacích projektu KliWeS (SCHWARZE et al. 2016; HAUFFE et al. 2016).

Prostřednictvím Hydrologického portálu Saska bylo získáno celkem 13 různých projekcí hydrologických prvků pro období let 1961 – 2100 (3 realizace WETTREG a 10 realizací WEREX V). Pro účely výběru projekcí, použitých v projektu ResiBil, byly tyto datové sady nejprve vy-selektovány pro dílčí území Lückendorf a vyhodnoceny z hlediska vývoje rozhodujících parametrů efektivní infiltrace. Pro další použití v projektu byly vybrány následující scénáře:

#### WEREX V - Realizace 11

Realizace 11 datové sady WEREX z Hydrologického portálu Saska znamená pro dílčí území Lückendorf nižší pokles efektivní infiltrace v porovnání se stávající hodnotou. Tento scénář tak popisuje méně významnou reakci klimatu na vodní režim.

#### WEREX V - Realizace 77

Realizace 77 datové sady WEREX z Hydrologického portálu Saska znamená pro dílčí území Lückendorf výraznější pokles efektivní infiltrace v porovnání se stávající hodnotou. Tento scénář tak popisuje intenzivnější reakci klimatu na vodní režim.

#### WEREX V - Medián

WEREX V Medián znamená pro dílčí území Lückendorf střední dopad na efektivní infiltraci

v porovnání se stávající hodnotou. Tato realizace nebyla získána prostřednictvím Hydrologického portálu Saska, ale byla pro účely projektu zpracována manuálně. Představuje medián deseti realizací datové řady WEREX V, které jsou na hydrologickém portálu Saska k dispozici.

Na základě těchto tří scénářů byla pro simulaci numerického modelu podzemní vody použita vypočtená tvorba nových zdrojů podzemních vod.

#### 4.2.3. Oblast Děčínského Sněžníku

Modelová oblast je vymezena tak, aby zahrnovala celé pilotní území a zároveň aby bylo možné definovat okrajové podmínky s co nejmenší nejistotou. Podle dostupných podkladů je pro oblast definovaný dvoukolektorový systém s kolektorem A v cenomanských pískovcích nad podložím křídových sedimentů a kolektorem BC v turonských pískovcích.

Modelovou oblast vymezují následující okrajové podmínky:

Pro kolektor BC

- Řeka; podél Labe na severu a severovýchodě podél potoka Ostrovská Bělá/Biela na západě
- Nulový průtok; linie rozvodnice na jihozápadě
- Drenáž; podél výchozů podložního izolátoru v údolí Labe na východě Pro kolektor A
- Nulový průtok; na západ podél potoka Ostrovská Bělá/Biela (odpovídá linii rozvodnice)
- Konstantní hladina; na severu a na východě není kolektor omezený, pokračuje pod Labem do oblasti Hřensko/Kirnitzsch
- Drenáž; podél výchozů kolektoru v údolí Labe na východ mezi Horním Žlebem a státní hranicí
- Řeka; na jihozápadě v oblasti výchozu kolektoru A při Ostrovu.

ČGS na základě souborů dat z vrtů na saské i české straně připravila plochy stropů a bází kolektorů a izolátorů pro definici geometrie. Plochy vznikly interpolací dostupných bodových vrtných údajů. Tektonické zlomy, kde jsou plochy přerušeny vertikálními posuny, byly definované jako zlomové linie s intenzivnějšími změnami výšky. Připravené byly následující "shapefile":

- podloží křídy
- strop kolektoru A
- báze kolektoru BC
- strop kolektoru BC
- strop souvrství Ca
- báze souvrství Cb

Připravena byla dále mapa hladin podzemní vody pro kolektory A a BC. Jako archivní podklad k přípravě mapy posloužila mapa hladin z projektu Rebilance zásob podzemních vod (2016) a předcházející dílo Hydrogeologická syntéza české křídové pánve – Bilanční celek 3 (1987). Tyto podklady byly použitelné pouze pro menší část pilotního území v České republice. Pro část v Německu nebyly k dispozici žádné archivní mapové podklady s hladinami podzemní vody. Získán byl soubor 13 hydrogeologických vrtů z této oblasti.

Zhotovení mapy hladin podzemní vody kolektoru BC se opírá o archivní izolinie na území České republiky, údaje ze dvou nových průzkumných vrtu Re001 a Re002 a údaje z vybraných vrtů poskytnutých saskými partnery. Saské vrty byly vybrány na základě lokace a příslušné hloubky vrtů a vystrojení odpovídajícího kolektoru BC. Obr. 4-4: Mapa okrajových podmínek a hladin kolektoru BC



Zhotovení mapy hladin podzemní vody kolektoru A se opírá o archivní izolinie na území České republiky, a údaje z vybraných vrtů poskytnutých saskými partnery. Saské vrty byly vybrány na základě lokace a příslušné hloubky vrtů a vystrojení odpovídajících kolektoru A. Kolektor A dle předpokladů není zcela odvodněn do koryta Labe a je pod Labem propojen s oblastí na pravém břehu řeky. Nová mapa zobrazuje spojené izolinie napříč údolím. K významnému odvodnění kolektoru A do Labe dochází především v oblasti výchozu cenomanského souvrství a podloží v údolí Labe mezi Horním Žlebem a státní hranicí.

#### Hydrogeologický řez:

Provedena byla analýza archivních karotážních záznamů z vybraných vrtů v oblasti. Na základě hodnot přirozené radioaktivity hornin, měrných elektrických odporů hornin a neutronové karotáže byly určeny polohy zvodnělých vrstev a nepropustných hornin. Výsledky karotážních měření byly prostorově a výškově srovnány a byly nakresleny hydrogeologické řezy zastižených turonských souvrství.

V oblasti Děčínského Sněžníku byl připraven řez spojující vrty 4630-A (Sněžník), DS-1-Nc (Kristin Hrádek), DS-2-Nc (Maxičky) a 4630-B (Říjiště)




Vrt 4630-A v oblasti Sněžníku ověřil pouze vyšší polohy středního turonu, kde bylo identifikováno střídání až 15 m mocných vrstev propustnějšího pískovce a méně propustných pískovců s větším podílem jemnozrnných frakcí. Z dalších vrtů byl vykreslen souvislý karotážní řez s bází turonského kolektoru BC v úrovni 360 m n. m. u Kristínina Hrádku až 320 m n. m. východně od Maxiček u Říjiště. Podle podkladů poskytnutých ČGS se předpokládá báze kolektoru BC zhruba o 15 m níže. Kolektor BC je dle karotážních měření přerušen dvěma méně propustnými polohami pískovců s větším podílem jemnozrnných frakcí. První se vyskytuje zhruba 6 až 13 m nad bází BC a dosahuje mocnosti okolo 3 m. Druhá se vyskytuje zhruba 53 m nad bází BC a dosahuje mocnosti okolo 6 m. V tomto výškovém horizontu bylo zmapováno pouze minimální množství pramenů, proto hydrogeologickou funkci těchto poloh nelze potvrdit jevy v terénu.

## 4.2.4. Oblast Hřensko/Křinice

Modelová oblast je vymezena tak, aby zahrnovala celé pilotní území a zároveň, aby bylo možné definovat okrajové podmínky s co nejmenší nejistotou. Podle dostupných podkladů je pro oblast definovaný dvoukolektorový systém s kolektorem A v cenomanských pískovcích nad podložím křídových sedimentů a kolektorem BC v turonských pískovcích. V severozápadní části, převážně na území Německa je definovaný tříkolektorový systém, kde je turonský kolektor rozdělen na dvě části a sice na spodnoturonský kolektor B a středněturonský kolektor C.

Modelovou oblast vymezují následující okrajové podmínky: Pro kolektor BC

- Řeka; podél Kamenice a Chřibské Kamenice na jihovýchodě
- Nulový průtok; podél lužické poruchy na severu, podél Doubického zlomového pásma na východě, po hydrogeologické rozvodnici na jihu
- Drenáž; podél výchozů podložního izolátoru v údolí Labe na západě Pro kolektor A
- Nulový průtok; podél lužické poruchy na severu, podél Doubického zlomového pásma na východě, po hydrogeologické rozvodnici na jihu
- Konstantní hladina; na severozápadě není kolektor omezený, pokračuje pod Labem do oblasti Děčínského Sněžníku a dále po proudu Labe
- Drenáž; podél výchozů kolektoru v údolí Labe na západě mezi Suchou Kamenicí a Děčínem Geometrie kolektorů je definována na základě podkladů předchozích úkolů GRACE
- a Rebilance podzemních vod. Použité jsou následující "shapefile":
- podloží křídy
- strop kolektoru A
- báze kolektoru B
- strop kolektoru B
- báze kolektoru C
- digitální model terénu

Zhotovení mapy hladin podzemní vody kolektoru A a BC se opírá o archivní izolinie na území České republiky (projekt Rebilance zásob podzemních vod), výstupy projektu GRACE Společně využívané podzemní vody na česko-saském pomezí a nových průzkumných vrtu 4660\_2T a 4660\_2C zhotovených v rámci projektu Rebilance zásob podzemních vod v roce 2015. Pro upřesnění situace na území SRN byl získán soubor údajů z 11 hydrogeologických vrtů z této oblasti.



Obr. 4-6: Mapa okrajových podmínek a hladin kolektoru A

V severozápadní části území byly připraveny mapy hladiny pro tříkolektorový systém (dvě turonské zvodně B a C). Saské vrty byly rozřazeny a vybrány na základě lokace a příslušné hloubky vrtů respektive vystrojení. Izolinie pro kolektor B byly sestrojeny na základě údajů z vrtů:

- Nasser Grund HySca 21/82/2
- Wurzelweg HySmil 4/81
- Grosser Zschand 1a/95 mitte

Izolinie pro kolektor C byly sestrojeny na základě údajů z vrtů:

- Nasser Grund HySca 21/82/4
- Wurzelweg HySmil 2/81
- Quenenwiese 13Z/65
- Zeughaus 11Z/65
- Zschand HySml 6/81
- Zschand HySml 5/81
- Grosser Zschand 1a/95 oben

Jihozápadní část území mezi obcemi Růžová a údolím Labe nebyla dosud z hydrogeologického hlediska dostatečně prozkoumána. V tomto prostoru se přitom v turonském kolektoru nachází rozvodnice mezi drenážními bázemi řek Kamenice a Labe. Vzhledem k nedostačujícím údajům o hladinách podzemní vody byly v oblasti prozkoumány prameny. Zmapované prameny byly rozřazeny do dvou skupin. Pro prameny mělké zvodně jsou



charakteristické: kolísavá vydatnost, konduktivita a vyšší nadmořská výška. Prameny v údolí Labe pod výchozy turonských pískovců, ale nad úrovní stropu krystalinika, byly zařazeny k hlubší turonské zvodni BC. Nadmořskou výškou zpravidla odpovídají předpokládané bázi turonského kolektoru, která klesá k severu. Tyto poznatky byly použity pro novou interpretaci hladin podzemní vody v jihozápadní části území.

V severní části je kolektor A dle předpokladů částečně odvodněn do koryta Labe a je pod Labem propojen s oblastí na levém břehu řeky. Nová mapa zobrazuje spojené izolinie napříč údolím.

## Hydrogeologické řezy:

V oblasti Hřenska byly připraveny 3 řezy spojující vrty.

- 4660-2C (Hřensko), DKP-25 (Zámeček), K-II-c (Vysoká Lípa) a 2H-304 (Jetřichovice) Dle karotážních měření je kolektor BC v oblasti od Hřenska po Jetřichovice přerušen několika méně propustnými polohami pískovců s větším podílem jemnozrnných frakcí. Souvislý kolektor BC se nachází nad bází BC v mocnosti okolo 55 m. Nad touto úrovní dochází ke střídání dobře propustných pískovců s polohami pískovců s větším podílem jemnozrnných frakci. Jednotlivé vrstvy dosahují mocnosti od 5 do 18 m. Tato poloha tvoří nesouvislou polohu poloizolátoru a polokolektoru, kterou lze obecně považovat za vrstvu s nižší propustností. Toto souvrství funguje jako bariéra nadložních turonských propustných kolektorů.
- K-II-c (Vysoká Lípa), VP8462N, K-1-c, J-167222, KO-1 (směr na severovýchod)
  Severovýchodně od Vysoké Lípy je kolektor BC rovnoměrně přerušen několika vrstvami.

Obr. 4-7: Mapa okrajových podmínek a hladin kolektoru BC Vrstvy propustných pískovců dosahují mocnosti okolo 25 m a jsou odděleny asi 5 m mocnou vrstvou méně propustných pískovců s větším podílem jemnozrnných frakcí. Takové sekvence jsou v těchto vrtech zaznamenány 4, ve větší vzdálenosti od Vysoké Lípy 3. Mocnost celého kolektoru BC dosahuje od 125 m ve Vysoké Lípě do 180 m u vrtu VP-8462N. Ve vrtu J-167222 byl zaznamenán podobný vývoj v mírně zakleslé poloze. Popsané sekvence se střídají do výšky okolo 150 m nad bází BC. Nad tím jsou souvislé pískovce. Celková mocnost kolektoru BC zaznamenaná ve vrtu J-167222 činí 300 m.

- J-139165 (Hadí Pramen), KO-1, J-123254 (Doubice), J-123319 (Chřibská) Polohy méně propustných pískovců popsané v předchozím odstavci jsou interpretovány i na tomto řezu – ve spodní části kolektoru BC. Ve vrtu J-139165 je nad bází BC asi 75 m mocná vrstva propustných pískovců. Nad ní dochází ke střídání 5-10 m mocných vrstev méně propustných pískovců s větším podílem jemnozrnných frakcí a 10-30 m mocných propustných pískovců. K tomuto střídání dochází v zóně s mocností okolo 100 m. Nad tím jsou opět propustné pískovce. Kolektor BC dosahuje dohromady mocnosti okolo 350 m. V blízkosti Doubice je vývoj podobný. Celková mocnost zde dosahuje okolo 420 m.
- J-139165 (Hadí pramen), Lo-7-Jc, J-087183, J-060173 (Vlčí Hora)
  Polohy méně propustných pískovců, popsané v předchozím odstavci, jsou interpretovány
  i na tomto řezu ve spodní části kolektoru BC. Nad bázi BC je 40 až 55 m mocná vrstva
  propustných pískovců.

## 4.2.5. Oblast Lückendorf

Modelové území Lückendorf se skládá z následujících kolektorů:

## Kolektor A (útvar Oberhäslich-Formation)

Nejspodnější kolektor A se skládá z cenomanských pískovců a nachází se nad krystalickým podložím, které je v modelu definováno jako izolátor (hranice nepropustná). Koncepční okrajové podmínky čtvrtého kolektoru jsou na severu a na východě utvářeny Lužickým zlomem, který je považován za hydraulicky nepropustný. Na západně a na jihu jsou omezení dána okrajovou podmínkou 1. druhu. Tento kolektor je vodou zásobován vertikální infiltrací prostřednictvím kolektoru BC. Infiltrace je však zpomalována izolátorem A/B, který se nachází nad těmito vrstvami. Pohyb vody probíhá v tomto kolektoru ve směru na jih až jihozápad a sleduje spád krystalického podloží.

## Izolátor A/BC (útvar Dölzschen-Formation)

Nad tím ležící izolátor A/BC se v modelu rozprostírá nad celým kolektorem 4 s výjimkou východní části území. Tam se nacházejí části 4. kolektoru na povrchu, které navíc zajišťují tvorbu nových zdrojů podzemní vody v této zvodni.

## Kolektor BC (útvar Oybin-Formation)

Nadložní turonský kolektor BC je rozšířen v celém modelovém území. V regionu je považován za nejdůležitější kolektor pro odběr podzemní vody. Na severu a severovýchodě je ohraničen Lužickým zlomem, který byl v modelu definován jako izolátor.

Kromě toho je na jihu ohraničen Panenským potokem, na severozápadě Hamerským potokem a na jihozápadě hranicí povodí Heřmanického potoka. Kolektor BC se na 2/3 sledovaného území nachází v blízkosti povrchu pod velmi mělkou vrstvou půdy.



V této oblasti se nachází v nenapjatém stavu. Kolektor je odvodňován dvěma lokálními systémy povrchových vodních toků a dvěma většími, vodohospodářsky využívanými prameny. Vodohospodářské využití tohoto kolektoru probíhá většinou formou studní.

## Izolátor BC/D (útvar Lückendorf-Formation)

Izolátor C/D pokrývá podložní kolektor z 1/3 rozlohy území. Důsledkem toho je kolektor na těchto místech napjatý a tvorba nové podzemní vody je omezená. Pouze na okrajích izolátoru C/D je do kolektoru BC přiváděna voda z pramenů.

## Kolektor D (útvar Waltersdorf-Formation)

Kolektor D je rozšířen v severozápadní části řešeného území a hraničí na severu s Lužickým zlomem. Na severozápadě je ohraničen Hamerským potokem a sahá až po hranice obce Jonsdorf. Tvorba nových zdrojů podzemní vody probíhá opět prostřednictvím jeho povrchu.

## Tercierní pánev

Žitavská pánev se nachází na severní hranici modelu v krystaliniku. V modelu je definována jako samostatný kolektor bez lokálního kontaktu se systémem kolektorů v pískovcích. Z důvodů ohraničení projektového území bylo možno modelovat pouze část Žitavské pánve. Tato terciérní pánev byla proto vymezena potenciálovým gradientem jako okrajová podmínka. Tvorba nových zdrojů podzemní vody zde probíhá rovněž prostřednictvím nenasycené vrstvy půdy.

Geometrie výše popsaného systému kolektorů byla modelována jako trojrozměrný sloupcový model na základě: geologické mapy (Mlčoch et al. 2018), českých datových sad

Lückendorf

k výškové úrovni jednotlivých geologických vrstev, dat ze saských vrtů, geologické mapy v měřítku 1 : 50 000 (GK 50 Eiszeit) a digitálního modelu terénu firmy G.E.O.S. Freiberg (2019). Model obsahuje prostorové informace ke stávajícím kolektorům, izolátorům, poruchám a zlomům, které se v území vyskytují.

Na základě shora popsaných prostorových informací, vlastností materiálů z předcházejícího projektu GRACE (Vaněk, 2013), detailních průzkumů z let 1976-1978 a map hydroizohyps z posudku firmy G.E.O.S. Freiberg (1998), měření hladiny podzemní vody, prováděných VÚV, a dat hladiny podzemní vody z monitorovacích vrtů na měření hladiny podzemní vody byl koncepční model sestaven a kalibrován jako numerický model proudění podzemní vody.



Obr. 4-9: Drenážní systém a monitorovací vrty modelu Lužické hory

## 4.3. Hydraulické modely

Jako nástroj pro matematické modelování byl v případě lokality Děčínský Sněžník a Hřensko – Křinice použit proudový model MODFLOW (Harbaugh, McDonald, 1996). Je to 3rozměrný model založený na metodě konečných diferencí. Modelovaná oblast se nejprve vertikálně rozdělí do vrstev a uvnitř těchto vrstev se definují elementy s obdélníkovou základnou. V modelované oblasti je možné definovat zdroje a odběry vody jako jsou studny, plošné zdroje z dešťových srážek, evapotranspirace, čerpané studny, drenáže, vodní toky.

Vlastní hydraulický model MODFLOW je součástí programového balíku VISUAL MODFLOW PRO, který slouží jako uživatelské prostředí pro převod vstupních dat do modelovacích algoritmů a grafickou interpretaci výsledků. Výhodou je modulární stavba softwaru, kdy vedle hlavního programu existuje velké množství nezávislých podprogramů řešících jednotlivé dílčí úlohy. K vytvoření matematického modelu dílčího území Lückendorf byl použit software FEFLOW (Diersch 1979), pomocí něhož lze vytvořit trojrozměrný model na základě metody konečných prvků. Modelové území se nejprve horizontálně rozdělí na hydrogeologické vrstvy. Při vymezení okrajových podmínek modelového území byly zohledněny prameny, odběry vody, plošná infiltrace ze srážek, evapotranspirace a drenáž do povrchových vodních toků. Následně síťový generátor vypočetl trojrozměrnou síť z trojúhelníkových elementů, která musí dodržet stanovená kritéria stability.

Program FEFLOW je součástí programového balíku Groundwater modelling společnosti DHI WASY, který jako uživatelské rozhraní slouží ke konverzi vstupních dat do algoritmů modelování a grafické interpretaci výsledků. Výhoda spočívá v možnosti přesnějšího geometrického přizpůsobení sítě dané prostorové poloze různých objektů, které jsou z hydraulického hlediska významné pro výpočet.

V následujících kapitolách uvádíme jen stručný přehled metodiky a výsledků modelování. Pro podrobnější informace odkazujeme na příslušné závěrečné zprávy týkající se matematického modelování (Navrátilová, Nol 2019 a, b, Pohle 2020)

## 4.3.1 Hřensko – Křinice

## Koncepce řešení

Hlavním stavebním kamenem matematického modelu bylo vytvoření společného přeshraničního hydrogeologického modelu, ve kterém je datově definována geometrie a rozsah všech významných kolektorů a (polo)izolátorů. Na počátku byly celým řešitelským týmem projektu odsouhlaseny základní principy pro jeho stavbu:

- 1 Výsledný přeshraniční hydrogeologický model (čili vymezení kolektorů) musí na modelových hranicích odpovídat hydrogeologickým strukturám jak na českém, tak německém území.
- 2 Výsledné modelové vrstvy, které budou v matematickém modelu odpovídat kolektorům a izolátorům, jsou průběžné a musí se vyskytovat v celé modelové oblasti na území obou států. V praxi to znamená, že pokud se kolektory D a C vyskytují na německém území, musí mít na českém území svoje ekvivalenty.
- 3 Jelikož na českém území existují pouze indicie a bodové informace o výskytu samostatných kolektorů D a C, bylo převzato německé členění kolektorů i pro českou část území.
- 4 Sestavování přeshraničního hydrogeologického modelu z roku 2014 v oblasti Hřensko-Křinice/Kirnitzsch bylo zahájeno úpravou geologického modelu od firmy G.E.O.S. (Voight et al., 2013; Kahnt et al., 2014; Nol, 2014) v říjnu 2013, v němž bylo vymezeno 14 geologických vrstev křídových sedimentů na německém území. Vrstvy byly označeny HGK 800 až HGK 990. Podle Rösnera et al., (2008) byly jednotlivé geologické vrstvy spojeny do hydrogeologických kolektorů a poloizolátorů.

Na německém území bylo vymezeno 7 hydrogeologických vrstev, které odpovídají 4 kolektorům a 3 poloizolátorům. V rámci členění modelové oblasti na jednotlivé modelové vrstvy platí pravidlo, že modelové vrstvy musí být průběžné a vyskytovat se v celé modelové oblasti. Z tohoto důvodu byly německé hydrogeologické vrstvy extrapolovány i na české území.

Vymezení kolektorů A a B bylo na českém území provedeno podle Herčíka et al. (1987), dat z ČGS-Geofondu, dat z archivu zhotovitele a vrtů uvedených v práci Patzeltové (2004). Jednotlivé báze kolektorů A a BC a strop kolektoru A vymezené Herčíkem et al. (1987) byly zdigitalizovány, upraveny podle nových dat a propojeny s německým hydrogeologickým modelem. Strop kolektoru B a báze kolektoru C na českém území byly odvozeny podle nadmořské výšky pramenů, které byly zdokumentovány Eckhardtem (2013). Báze kolektoru C byla stanovena na 220 m n. m. v oblasti jižně od linie jdoucí ve směru toku Dlouhé Bělé. Od báze kolektoru C bylo odečteno 20 m (mocnost poloizolátoru C/B), a tak byl specifikován strop kolektoru B. Strop kolektoru B a báze kolektoru C byly na závěr propojeny s jejich ekvivalenty v německém hydrogeologickém modelu.

V původní koncepci byla geometrie kolektoru C a okrajové podmínky definovány následovně: Kolektor C je na severu, východě, jihovýchodě, jihu a západě omezen hranicí s nulovým průtokem. Potenciální přítok z krystalinika podél lužické poruchy byl zanedbán. Umístění nulového průtoku podél lužické poruchy na německém území bylo převzato podle geologického modelu firmy G.E.O.S. a na českém území podle rozsahu hydrogeologického rajonu 4660 – Křída Dolní Kamenice a Křinice. V kolektoru C byla uvažována Křinice jako okrajová podmínka "řeka". V místech mezi křížením Křinice s lužickou poruchou a Zadními Doubicemi byla uvažována okrajová podmínka "drén". V kolektoru C bylo dále specifikováno čerpání na vrtu 50516006 (Neumannmühle), který odebírá podzemní vodu i z kolektoru B.

V místech, kde byl kolektor C již oderodován, byla definována okrajová podmínka "drén", která umožňuje odtok podzemní vody z modelové oblasti, nebo zde bylo prostřednictvím vertikální hydraulické vodivosti nastaveno přetékání do podložního kolektoru B. Obě řešení mají svoje výhody a bohužel nevýhody. Okrajová podmínka "drén" zajišťuje stabilní odtokovou hydraulickou výšku na okraji kolektoru C, nicméně podzemní voda modelově odchází mimo simulovaný systém a neobohacuje podložní kolektor B, jak je tomu zřejmě ve skutečnosti.

Pro potřeby modelu byla báze kolektoru C snížena pod úroveň dna údolí a tím nedošlo k vysychání buněk na okraji rozsahu kolektoru C, bilance podzemní vody a hladiny podzemní vody odpovídala a vztah mezi kolektorem C a kolektorem B byl řešen horizontální hydraulic-kou vodivostí. Toto řešení platilo i pro území jižně od Kamenice.

Báze kolektoru D byla na českém území extrapolována podle sklonů na německém území a místně upravena podle nadmořské výšky pramenů, které náleží do kolektoru D. Rozsah kolektoru D na českém území byl upraven podle digitálního modelu terénu. Od báze kolektoru D bylo odečteno 10 m (mocnost poloizolátoru D/C) a tím byl specifikován strop kolektoru C.

Implementací nové geometrie byl stacionární model ve druhé etapě aktualizován a přepracován na transientní model proudění podzemní vody, který byl kalibrován na jednorázově měřené hladiny podzemní vody a na kolísání dlouhodobě sledovaných vrtů české a německé pozorovací sítě. Během kalibrace byly upravovány hydraulické parametry tak, aby byla dosažena dobrá shoda mezi měřenými a simulovanými hladinami podzemní vody.

## Geometrie a typ vrstev

Hydraulický model byl uvažován jako sedmivrstevný. Všechny báze na německém území upadají směrem na sever a mají charakter homoklinály, kdežto na českém území je na bázi a stropu kolektoru A a bázi kolektoru B patrná antiklinála. Tato antiklinální část mohla být založena zčásti nebo zcela tektonicky. Pro strop kolektoru B a bázi kolektoru C je na českém území charakteristické horizontální uložení modelových vrstev. Antiklinální stavba zde nebyla uvažována (hladina podzemní vody v kolektoru C by se pohybovala pod jeho bází). V těchto místech je kolektor pravděpodobně definován spíše vyšším stupněm rozpukání než litologicky, což dokazuje četnost pramenů. Modelové vrstvy byly zadány jako typ B (kolektor s volnou hladinou nebo napjatou hladinou).

## Vstupní parametry

Pro kolektor B v oblasti Křinice byla použita průměrná hydraulická vodivost  $2.10^{-5}$  m/s, kterou stanovila Jetelová (1972). Hydrodynamické zkoušky provedené v rámci průzkumů prameniště Hřensko (Nakládal, 1989) udávají hodnoty  $1.10^{-5}$  až  $7.10^{-4}$  m/s, přičemž hodnoty hydraulické vodivosti řádu n $.10^{-4}$  m/s odpovídají silně tektonicky porušeným pískovcům kolektoru B. Hodnota hydraulické vodivosti je ve velmi dobré shodě s německými podklady, kde Rösner et al. (2008) uvádí jako reprezentativní hodnotu hydraulické vodivosti  $1.10^{-5}$  m/s (pro kolektor C a B).

Z těchto důvodů byla na počátku kalibrace použita horizontální hydraulická vodivost 2.10<sup>-5</sup> m/s v celé modelové oblasti pro oba kolektory a 10krát vyšší hodnota v tektonických zónách prameniště Hřensko. Dále byly oba kolektory charakterizovány vertikální hydraulickou vodivostí 2.10<sup>-6</sup> m/s. Pro poloizolátor C/B byla specifikována horizontální hydraulická vodivost 1.10<sup>-8</sup> m/s a vertikální hydraulická vodivost 1.10<sup>-9</sup> m/s (podle výsledků první etapy modelování). Na okrajích rozsahu poloizolátoru C/B byla vertikální vodivost poloizolátoru C/B snížena na 1.10<sup>-6</sup> m/s, čímž byl povolen přetok z kolektoru C do kolektoru B. Během kalibračního procesu byly hydraulické parametry měněny tak, aby došlo k dobré shodě mezi modelovými a pozorovanými hladinami podzemní vody.

Pro kolektory s volnou hladinou podzemní vody byla předpokládána volná storativita 0,05 a 0,01 pro poloizolátory. Na základě diskuze průběžných modelových výsledků a po předložení obvyklých hodnot na německém území německou stranou byla pro kolektory C a B přejata hodnota 0,1. Tato hodnota se shoduje s hodnotou 0,1 stanovenou Nakládalem (1975). Specifická storativita 0,0001 (1/m) byla použita pro všechny modelové vrstvy. Herčík et al. (1987) uvádí specifický základní odtok pro celý rajon 466 v hodnotě 8,36 l/s/km<sup>2</sup>. Odvozená infiltrace dosahuje 264 mm/rok, což odpovídá přibližně 29% průměrného ročního úhrnu na srážkoměrné stanici v Chřibské (912 mm/rok). Herčíkem et al. (1987) odvozených 264 mm/rok je ve velmi dobré shodě s výsledky projektu KliWES, kde byla stanovena průměrná hodnota infiltrace na 253 mm/rok.

## Kalibrace

Celá hydrogeologická struktura je kontinuálně sledována celkem 20 vrty, z nichž 2 vrty popisují chování hladin podzemní vody od roku 1967. Monitorovací vrty však neposkytují dostatečnou představu o plošných piezometrických poměrech v jednotlivých kolektorech. Nicméně na českém území existuje řada historických a jednorázově zaměřených vrtů. Tyto vrty vykazují menší reprezentativnost měření, jelikož nepostihují kolísání hladiny podzemních vod, a jsou proti sobě těžko porovnatelné (hladiny podzemní vody byly často zaměřeny v různém časovém období). Přesto i tato časově jednorázová informace dovoluje zpřesnit modelové výsledky pomocí kalibrace.

Všechny údaje o hladinách podzemní vody byly rozděleny do celkem 7 kalibračních skupin vrtů s různým významem na spolehlivost a věrohodnost hydraulického modelu. Prvních 5 kalibračních skupin (1 až 5) je tvořeno skupinami vrtů, které byly jednorázově zaměřeny a vyvrtány na českém území v obdobích 1961–1979 (kalibrační skupina 1), 1980–1990 (kalibrační skupina 2), 1991–2007 (kalibrační skupina 3), jednorázové hladiny podzemní vody v roce 2007 na českém území (kalibrační skupina 4) a na německém území (kalibrační skupina 5, Rösner et al., 2008).

Kalibrace matematického modelu byla rozdělena do dvou fází. V první byla použita konstantní infiltrace. Jakmile bylo dosaženo relativně dobré shody mezi měřenými a modelovými hladinami podzemní vody, nastoupila druhá fáze, kde byla zadána časově proměnná infiltrace.

## Simulované proudění podzemní vody

Proudový model oblasti vystihuje piezometrické poměry zkoumaného území Hřensko-Křinice. Podzemní voda v kolektorech C–A proudí od východu na západ.

V kolektoru D podzemní voda přetéká do podložního kolektoru C a proudí ve směru úklonu dílčích výskytů kolektoru D. Proudění podzemní vody je v kolektoru C řízeno především Křinicí, existencí vulkanického tělesa a rozsahem poloizolátoru C/B. Ve východní části modelové oblasti je hladina podzemní vody v kolektoru C totožná s hladinou podzemní vody v kolektoru B a vytváří spojený kolektor B+C. V centrální části modelové oblasti se v modelových hydroizohypsách projevuje drenážní vliv Křinice. Dochází zde také k vytvoření rozdílu hladiny podzemní vody mezi kolektory C a B (díky přítomnosti poloizolátoru C/B).

Hladina podzemní vody v kolektoru C se pohybuje zhruba o 5 až 20 m výše než v kolektoru B. Zhruba podél státní hranice se vytváří rozvodnice a hlavní proud podzemní vody se štěpí na severní a jižní. Severní proud směřuje ke Křinici a jižní proud podzemní vody míří k okrajům výskytu kolektoru C, kde přetéká do kolektoru B. V kaňonu Labe a Kamenice je kolektor C drénován omezeně, což je dáno předpokládaným úklonem báze kolektoru C ke Křinici. Na modelových hydroizohypsách v kolektoru C se výrazně projevují dva prvky: dílčí deprese vyvolaná přetékáním do kolektoru B podél předpokládaného zlomu v linii Dlouhá Bělá a hladinový skok způsobený nižší propustností vulkanického tělesa.



Obr. 4-10: Ukázka modelových hladin kolektoru C pro rok 2018 Podzemní voda v kolektoru B proudí v západní části modelové oblasti stejným směrem, jako podzemní voda v kolektoru C. V centrální části dochází k oddělení severního a jižního proudu stejně jako v případě kolektoru C. Jižní proud směřuje k jímacímu území Hřensko a ke Kamenici. Severní proud směřuje k jímacímu území ve Felsenmühle a Neumannmühle a ke Křinici v Bad Schandau, kde je drénován do toku Křinice, a k Labi, kde dochází k jeho odvodnění.

Podzemní voda v kolektoru A proudí z infiltrační oblasti na východě směrem na západ k Labi, kde však k drenáži nedochází. Podzemní voda v kolektoru A Labe patrně podtéká. Lokálně je podzemní voda drénována do Kamenice přes kolektor B a v údolí Křinice do kolektoru B.

## Vliv čerpání podzemní vody a infiltrace na režim a stav podzemních vod

Na kolísání hladin podzemní vody se podílejí dva faktory – velikost odběrů podzemních vod a změny infiltrace. Zatímco odběry jsou díky registraci čerpání faktorem snadno definovatelným, skutečná infiltrace v čase je stanovitelná s omezenou přesností. Odběry vstupují do hydraulického modelu jako průměrná množství v každém zaznamenaném roce a v hydraulickém modelu se nijak neupravují. Infiltrace se mění podle kalibrace hydraulického modelu na kolísání hladin podzemních vod na dlouhodobě sledovaných vrtech (kalibrační skupiny vrtů 6 a 7). V případě, že bude hydraulický model dobře nakalibrován na dostupné hladiny podzemní vody, lze jej použít pro kvantifikaci obou faktorů na kolísání hladin podzemních vod. V hydraulickém modelu se zruší všechna modelová jímání podzemní vody a provede se simulace bez čerpání úplně stejným způsobem jako v případě simulace s odběry. Oba scénáře se porovnají jak v ploše, tak i graficky prostřednictvím rozdílu hladin podzemní vody variant s odběry a bez odběrů.

Modelový rozdíl mezi stavem bez čerpání a stavem s čerpáním je výraznější v kolektoru B na prameništi Hřensko než v jímacím území ve Felsenmühle a Neumannmühle, které jímá podzemní vodu přirozeně se drénující do Křinice. Rozdíl hladin dosahuje až 8 m v jímacím území Hřensko a 4 m na pozorovacím vrtu 5051600\_2, což však není možné potvrdit přímým pozorováním, protože sledování na vrtu začalo až v roce 1998 a nepokrývá tudíž období největších poklesů.

V kolektoru C, kde je snížení způsobeno především poklesem hladin podzemní vody v kolektoru B, poklesy hladin podzemní vody nepřekračují 2,2 m. Na českém území modelově dochází i k poklesu podzemní vody v kolektoru C, i když se podzemní voda odebírá pouze z kolektoru B. Příčinou je přetok podzemní vody z kolektoru C na jeho okraji a přes tektonickou poruchu do kolektoru B. Pokud hladina podzemní vody v kolektoru B (vlivem odběrů) poklesne, zvýší se přetékání z kolektoru C do kolektoru B, což má za následek pokles hladiny podzemní vody i v kolektoru C.

#### Výpočet přírodních zdrojů a využitelného množství podzemní vody, střety zájmů

Z celkové sumy přírodních zdrojů lze dostupnými technickými prostředky využít jen určitou část, aniž by došlo například k nežádoucímu snížení průtoků v povrchových tocích během suchých period, během nichž je většina odtoku tvořena právě odtokem podzemním. A právě definování kritérií pro stanovení mezního (přijatelného) vlivu odběru rovnajícímu se využitelným zdrojům, má zásadní vliv na výslednou velikost stanovených využitelných zdrojů. Pokud bychom jako kritérium nastavili např. požadavek na setrvalý stav hladiny podzemní vody bez dalšího poklesu, pak by bylo možné využitelné zdroje podzemních vod ztotožnit s velikostí současných odběrů, jelikož každé další, byť nepatrné zvýšení čerpání bude v modelu ve výsledku znamenat snížení úrovně hladiny podzemní vody. To samé platí i v případě, že bychom zvolili "objemové" kritérium, tedy například základní odtok v některém z povrchových toků drénujících hlavní kolektor.

Je tedy nutné nastavit určité limity ať už ve formě minimální úrovně hladiny podzemní vody ve specifikovaných vrtech, nebo minimálního základního odtoku, při jejichž dosažení bude konstatováno, že dalším snižováním hladiny podzemní vody by již mohlo dojít k negativnímu vlivu na okolí. Tento "negativní vliv" má přitom velmi obecný charakter a může se týkat např. ovlivnění na vodu vázaných ekosystémů, dodržení hygienického (minimálního) průtoku v povrchových tocích nebo zachování vydatnosti důležitých vodárenských objektů.

Pro naše účely jsme využili tzv. "institut minimální změny hladiny", kdy je hledána maximální velikost čerpání, při níž ustálená hladina podzemní vody na pozorovacích bodech nepoklesne, anebo klesne o určitou stanovenou hodnotu a zároveň dojde ke změně směru proudění podzemní vody.

Pro modelová řešení s výše uvedeným zadáním byl využit scénář, který předpokládá konstantní infiltraci a čerpání po celou dobu predikce. Čas 30 let simulace je dostatečný k tomu, aby došlo k ustálení proudění podzemní vody a dosažení stacionárního stavu.

Pokud zvolíme jako kritérium nulovou změnu hladiny podzemní vody při konstantní infiltraci, stávající odběry na českém i německém území splňují toto kritérium. K největším prognózním poklesům podzemní vody dochází na vrtu 51516006\_2 (kolektor B), což je dáno napjatým režimem podzemních vod v kolektoru B a rychlejšími změnami stavu podzemních vod a dosahem obou depresních kuželů z českého a německého jímacího území. Pokud zvolíme tento vrt jako rozhodující kritérium, můžeme stanovit několik úrovní využitelného množství podle velikosti snížení hladiny podzemní vody na vrtu 51516006\_2 (Tab. 4-1).

Scénář	Popis	Odběry podzemní využitelnému	í vody odpovídající 1 množství [l/s]	Poklesy hladiny podzemní vody na vrtu	Ustálený stav	
		ČR SRN		51516006_2 [m]		
01 (výchozí scénář)	Skutečné (v roce 2012, konstantní do 2043)	74,30	38,7	nulové	Ano	
02	Zvýšené na 115 % ze skutečných v roce 2012 – pro stanovení využitelných zdrojů	Zvýšené na 115% ze skutečných v roce 2012 – pro stanovení 85,45 44,4 využitelných zdrojů		do 1 m	Ano	
03	Současné platné povolené množství (roční průměr)	103	70	do 2 m	Ano	
04	Snížené na 85 % maximálních zaznamenaných – pro stanovení využitelných zdrojů	118,30	51,85	do 3 m	Ano	
05	Maximální zaznamenané (konstantní do 2043)	139,18	61	do 4 m	Ano	
06	Zvýšené na 115 % maximálních zaznamenaných v roce 2012 – pro stanovení využitelných zdrojů	160,06	70,15	do 5 m	Téměř ano	

Tab. 4-1: Využitelné množství vs. poklesy hladiny podzemní vody na vrtu 51516006\_21

Při daném nastavení testu hodnocení využitelných zásob je možné konstatovat, že při akceptaci poklesů hladiny podzemní vody v modelovém území o maximálně 2 m, odpovídá velikost využitelných zdrojů podzemní vody sumě platných povolených odběrů (ročnímu průměru). Velmi důležité je však připomenout, že velikost stanovených využitelných zdrojů podzemních vod v rámci modelové oblasti je ovlivněna nejen všemi modelovými nejistotami, ale zejména volbou kritérií, která nesmí být překročena. V modelovém hodnocení byl využit institut minimální hladiny na vrtu 51516006\_2. Je nutné poznamenat, že při jiné volbě kritérií nebo rozdílném nastavení jejich limitních hodnot se může výsledné stanovení využitelných zdrojů značně lišit.

Přírodní zdroje byly modelem ověřeny na 250 mm za rok, což odpovídá 1481 l/s. Využitelné množství, které zajistí nepřetížení hydrogeologické struktury, činí 623 l/s. Při současných odběrech ve výši 105 l/s jsou disponibilní zdroje podzemní vody 518 l/s.

## 4.3.2. Děčínský Sněžník

## Koncepce řešení

Modelové řešení v oblasti Děčínského Sněžníku vycházelo z následující schematizace. Báze pokrývají celé území modelové oblasti vyjma lokalit, kde vystupuje na povrch krystalinikum nebo již byla hydrogeologická tělesa oderodována, což se týká především kaňonu Labe a jeho přítoků. Tato místa jsou vymezována ve formě polygonů, průběh izolinií je zde dokreslován, jako by zde vrstva pokračovala. V případě povrchového výskytu krystalinika zde bude specifikována odlišná horizontální i vertikální hydraulická vodivost, která bude hydraulicky vymezovat krystalinikum od okolních křídových sedimentů tvořících kolektor A a BC a poloizolátor A/BC.

Modelovaná oblast byla nejprve vertikálně rozdělena do vrstev, které odpovídají jednotlivým hydrogeologickým vrstvám, tj. kolektoru A, poloizolátoru A/BC a kolektoru BC.

Kolektor A je na bázi definován podložím křídy a na vrchu stropem A.

Poloizolátor A/BC je na bázi definován stropem A a na stropu bází BC.

Kolektor BC je na bázi definován bází BC a na stropu terénem.

Dílčí kolektory Ca a Cb nebyly definovány.

Importované soubory byly kontrolovány v prostředí VISUAL MODLOW PRO především z hlediska případného křížení modelových vrstev. Zvláštní důraz byl kladen na děčínské zlomové pásmo. Výška skoku zde dosahuje až 300 m a kompletně přerušuje kontinuitu geologických vrstev. V současnosti se nepředpokládá přetok podzemní vody mezi oblastí severně od děčínského zlomového pásma a oblastí jižně od děčínského zlomového pásma. Přetok však nelze vyloučit a byl dále testován při konstrukci transientního modelu. Z tohoto důvodu byly ověřovány možnosti propojení modelových vrstev přes děčínské zlomové pásmo. Průběžný přechod geologických modelových vrstev se neosvědčil. Numerická řešení proudění podzemní vody byla nestabilní, jelikož docházelo k vysušování modelových buněk v linii děčínského zlomového pásma a na jižním okraji severní oblasti.

Z toho důvodu byla zvolena koncepce 6 modelových vrstev, kde tři nejsvrchnější modelové vrstvy odpovídají kolektoru A, poloizolátoru A/BC a kolektoru BC v severní oblasti. Tyto vrstvy jsou v jižní oblasti nad terénem a tudíž modelově neaktivní. Tři spodní modelové vrstvy jsou naopak modelově aktivní (tj. zúčastňující se modelového výpočtu) v jižní modelové oblasti. V severní modelové oblasti se jejich fiktivní geometrie nachází pod úrovní tří nejsvrchnějších modelových vrstev a všechny tři spodní vrstvy jsou specifikovány jako neak-



tivní. V linii děčínského zlomového pásma je povoleno přetékání mezi kolektorem A v severní oblasti a kolektorem BC v jižní modelové oblasti.

Ve východní části oblasti ve 3. modelové vrstvě, která v severní části odpovídá kolektoru A, byl vytvořen tzv. meziprostor. V meziprostoru odpovídá 3. modelová vrstva v kolektoru B (BC). To znamená, že na hranici meziprostoru a severní části podzemní voda z kolektoru A proudí horizontálně do kolektoru B (BC).

Implementací nové geometrie byl stacionární model aktualizován a přepracován na transientní model proudění podzemní vody, který byl kalibrován na jednorázově měřené hladiny podzemní vody a na kolísání dlouhodobě sledovaných vrtů české a německé pozo-rovací sítě. Během kalibrace byly upravovány hydraulické parametry tak, aby byla dosažena dobrá shoda mezi měřenými a simulovanými hladinami podzemní vody.

## Geometrie a typ vrstev

Hydraulický model byl uvažován jako šestivrstevný. Všechny báze na německém území a v České republice severně od děčínského zlomového pásma upadají směrem na sever a mají charakter homoklinály, kdežto jižně od děčínského zlomového pásma báze a stropu kolektoru A a báze kolektoru BC je ukloněna na jih.

Modelové vrstvy byly zadány jako typ 3 (kolektor s volnou hladinou nebo napjatou hladinou).

## Vstupní parametry

Pro kolektor B v oblasti Křinice byla použita průměrná hydraulická vodivost 2.10<sup>-5</sup> m/s podle Jetelové (1972). Hydrodynamické zkoušky provedené v rámci průzkumů prameniště Hřensko (Nakládal, 1989) udávají hodnoty 1.10<sup>-5</sup> až 7.10<sup>-4</sup> m/s, přičemž hodnoty hydraulické vodivosti

řádu n.10<sup>-4</sup> m/s odpovídají silně tektonicky porušeným pískovcům kolektoru 3. Hodnota hydraulické vodivosti je ve velmi dobré shodě s německými podklady, kde Rösner et al. (2008) uvádí jako reprezentativní hodnotu hydraulické vodivosti 1.10<sup>-5</sup> m/s (pro kolektor C a B). Tyto hodnoty byly použity i pro Děčínský Sněžník.

Z těchto důvodů byla na počátku kalibrace použita horizontální hydraulická vodivost 2.10<sup>-5</sup> m/s v celé modelové oblasti pro oba kolektory a 10krát vyšší hodnota v tektonických zónách. Dále byly oba kolektory charakterizovány vertikální hydraulickou vodivostí 2.10<sup>-6</sup> m/s. Pro poloizolátor A/B byla specifikována horizontální hydraulická vodivost 1.10<sup>-8</sup> m/s a vertikální hydraulická vodivost 1.10<sup>-9</sup> m/s. V infiltrační oblasti mezi Děčínským Sněžníkem a Tisou byla vertikální vodivost poloizolátoru A/B snížena na 1.10<sup>-6</sup> m/s, čímž byl povolen přetok z kolektoru BC do kolektoru A. Během kalibračního procesu byly hydraulické parametry měněny tak, aby došlo k dobré shodě mezi modelovými a pozorovanými hladinami podzemní vody.

Pro kolektory s volnou hladinou podzemní vody byla předpokládána volná storativita 0,05 a 0,01 pro poloizolátory. Na základě diskuze průběžných modelových výsledků a po předložení obvyklých hodnot na německém území německou stranou byla pro kolektory 2 a 3 přejata hodnota 0,1. Tato hodnota se shoduje s hodnotou 0,1 stanovenou Nakládalem (1975) v oblasti Hřenska. Specifická storativita 0,0001 (1/m) byla použita pro všechny modelové vrstvy. Kašpárek et al. (2014) in Burda – Venera et al. (2016) uvádí specifický základní odtok pro celý rajon 4630 v hodnotě 6,95 l/s/km<sup>2</sup>. Odvozená infiltrace dosahuje 188 mm/rok, což odpovídá přibližně 23 % průměrného ročního úhrnu na srážkoměrné stanici v Tisé (824 mm/ rok). Do transientního modelu byla vložena infiltrace v měsíčním kroku.

## Kalibrace

Kalibrace modelu probíhala na základě identických principů jako v případě modelu Hřensko-Křinice.

Celá hydrogeologická struktura je kontinuálně sledována celkem 19 vrty, z nichž české vrty popisují chování hladin podzemní vody od roku 1993.

Monitorovací vrty však neposkytují dostatečnou představu o plošných piezometrických poměrech v jednotlivých kolektorech (především na jižní části a v meziprostoru, které nejsou prakticky sledovány. Nicméně na českém území existuje řada historických a jednorázově zaměřených vrtů. Tyto vrty vykazují menší reprezentativnost měření, jelikož nepostihují kolísání hladiny podzemních vod, a jsou proti sobě těžko porovnatelné (hladiny podzemní vody byly často zaměřeny v různém časovém období). Přesto i tato časově jednorázová informace dovoluje zpřesnit modelové výsledky pomocí kalibrace.

Dále byly pro rámcovou kalibraci použity nadmořské výšky pramenů, zářezů a mělkých studní.

Všechny údaje o hladinách podzemní vody byly rozděleny do celkem 3 kalibračních skupin vrtů s různým významem na spolehlivost a věrohodnost hydraulického modelu. Kalibrační skupinu 1 tvoří skupiny vrtů, které byly jednorázově zaměřeny a vyvrtány na českém území v období 1961–2007.

Kalibrační skupina 2 představuje časově proměnné údaje a bude použita pro kalibraci modelu na dlouhodobé kolísání hladin podzemní vody.

Kalibrace matematického modelu byla rozdělena do dvou fází. V první byla použita konstantní infiltrace. Jakmile bylo dosaženo relativně dobré shody mezi měřenými a mode-



Obr. 4-12: Ukázka modelových hydroizohyps kolektoru A pro rok 2018

lovými hladinami podzemní vody, nastoupila druhá fáze, kde byla zadána časově proměnná infiltrace.

## Simulované proudění podzemní vody

Proudový model oblasti vystihuje piezometrické poměry zkoumaného území v oblasti Děčínský Sněžník. Podzemní voda v obou kolektorech proudí v severní oblasti k jihu a na sever. V kolektoru BC podzemní voda v infiltrační oblasti přetéká do podložního kolektoru A a proudí ve směru úklonu dílčích výskytů kolektoru A. V jižní oblasti podzemní voda proudí k Jílovskému potoku a k Labi.

Podzemní voda v kolektoru A proudí z infiltrační oblasti na východě směrem na východ k Labi, kde však k drenáži nedochází. Lokálně je podzemní voda drénována do povrchových vod kolektoru BC.

## Výpočet přírodních zdrojů a využitelného množství podzemní vody

Výpočet přírodních zdrojů v oblasti Děčínského Sněžníku se řídil stejnými principy jak v předchozím případě lokality Hřensko-Křinice. Pro naše účely jsme opět využili tzv. "institut minimální změny hladiny", kdy je hledána maximální velikost čerpání, při níž ustálená hladina podzemní vody na pozorovacích bodech nepoklesne, anebo klesne o určitou stanovenou hodnotu a zároveň dojde k proudění podzemní vody.

V modelovém hodnocení byl využit institut minimální hladiny na vrtu HV-4. Je nutné poznamenat, že při jiné volbě kritérií nebo rozdílném nastavení jejich limitních hodnot se může výsledné stanovení využitelných zdrojů značně lišit.

Přírodní zdroje byly modelem ověřeny na 130 mm za rok, což odpovídá 724 l/s. Využitelné množství, které zajistí nepřetížení hydrogeologické struktury, činí 321 l/s. Při současných odběrech ve výši 78 l/s jsou disponibilní zdroje podzemní vody 243 l/s.

## 4.3.3. Lückendorf

## Koncepční model

Model pro území Lückendorfu vychází z následujících předpokladů. Modelové území v téměř celé ploše tvoří křídové pískovce. Výjimkou je území ve východních partiích české části modelu, kde křídové sedimenty erodovaly a kde se na povrchu nacházejí krystalické horniny. Horizontálně uložené cenomanské, turonské a coniacké pískovce vytvářejí na krystalickém podloží kolektor A, izolátor A/BC, kolektor BC, izolátor BC/D a kolektor D. V severní části modelového území vykazuje krystalinikum u Lužického zlomu vertikální posun až do 1 000 m (Krentz, Staněk 2015) a je zčásti nasunuto na pískovce. Na severovýchodním okraji se nachází tercierní pánev, vyplněná nad krystalinikem hnědouhelnými a štěrkopískovými vrstvami.

Charakterizace pískovcových geologických vrstev jako popsaných zvodněných a nepropustných vrstev je provedena podle jejich příslušných hydraulických vlastností. Kolektor A leží přímo na krystaliniku a je na svém horním rozhraní překryt jemnozrnnými sedimenty izolátoru A/BC. Celkem 2/3 povrchu modelového území jsou tvořeny kolektorem BC. Zbývající 1/3 je pokryta jemnozrnným izolátorem BC/D, nad kterým je kolektor D. Kolektor D je složen ze střídajících se středně zrnitých až jemnozrnných vrstev. Pískovcovými vrstvami modelovaného území prochází celá řada poruch, ovlivňujících horizontální hydraulický kontakt pískovců.

Pro modelování pomocí programu FEFLOW byly v prvním kroku do programu vloženy veškeré údaje o geometrii rozšíření vrstev, poruch, vodních toků, dílčích povodí infiltračních ploch a vrtů v georeferencované mapě. Za pomoci interního generátoru byla z těchto údajů vytvořena dvourozměrná síť trojúhelníkových prvků. Následně bylo celé modelové území rozděleno podle vertikálních zvodnělých a nepropustných struktur. V softwaru FEFLOW tak bylo možno vytvořit trojrozměrnou síť, obsahující veškeré důležité okrajové podmínky řešeného území.

Zvláštní pozornost byla přitom věnována vertikálním poruchám. Především poruchy, procházející Lužickým zlomem, mohou být teoreticky hydraulicky aktivní a mohou tedy zajišťovat spojení mezi severními krystalickými horninami/tercierní pánví a jižněji položenými zvodnělými vrstvami pískovců křídového stáří.

Na základě popsaných předpokladů byl vytvořen model Lückendorf skládající se z 10 vrstev. Pět z těchto vrstev je v horních oblastech neaktivní (šedivé zóny: viz obr. 4-13), jelikož zde nejsou rozšířeny odpovídající vrstvy pískovců a ostatních hornin. Z důvodů nasu-

#### 4 | MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ



Obr. 4-13: Vrstvy modelu FEFLOW pro Lückendorf.

nutí krystalického podloží na pískovec je první vrstva podél Lužického zlomu v jejím dalším průběhu jižním směrem neaktivní. To samé platí i pro vrstvy, které zachycují kolektor D, izolátor BC/D a části kolektoru BC.

Po implementaci vrstev modelu byl stacionární model nakalibrován pomocí dlouhodobých středních hodnot stavů hladiny podzemní vody, zdokumentovaných českou a německou monitorovací sítí. Hydraulické parametry byly přitom přizpůsobeny tak, aby bylo dosaženo dobré shody mezi naměřenými a simulovanými hodnotami hladin podzemní vody.

## Geometrie a druhy vrstev

Hydraulický model byl navržen s deseti vrstvami. Všechny vrstvy na českém a německém území jsou ukloněny jižním směrem, s výjimkou oblasti v bezprostřední blízkosti Lužického zlomu. V této oblasti jsou pískovcové vrstvy ukloněny severním směrem, protože byly překryty vrstvami nasunutých krystalických hornin. Jako výchozí stav byla pro všechny vrstvy modelu definovaná napjatá hladina podzemní vody, protože kalibrace hydraulických vlastností prostředí a okrajových podmínek pomocí softwaru FEPEST vykazuje v tomto případě nízkou míru nejistoty.

## Vstupní parametry

Model byl rozdělen do trojúhelníkových prvků pomocí interního síťového generátoru. Vzniklo tak celkem 482.594 aktivních prvků a 378.609 uzlových bodů. Aktivní plocha činí 135 km<sup>2</sup>. Geometrie vygenerovaných prvků je hodnocena z hlediska kritérií jejich stability (max. dihedrální úhel, poměr délky hran), které jsou důležité pro nižší chybovost numerického výpočtu.

Efektivní infiltrace byla vypočtena pomocí hydrologického modelu (kapitola 4.1). Výsledky v mm/ rok, které byly takto pro jednotlivá dílčí povodí získány, byly pomocí GIS mapy integrovány do modelu prostřednictvím ploch dílčích povodí. Jelikož v hydrologickém modelu nebyla počítána všechna česká dílčí povodí, byla míra doplňování podzemní vody těchto

Vrstva	Hydrologické zařazení	Horizontální hydraulická vodivost k <sub>h</sub> [m/s]		Vertikální I vodivost	nydraulická k <sub>z</sub> [m/s]	Porozita [%]	koeficient volné zásobnosti
		min.	max.	min.	max.		[-]
1	Kolektor 1	4,3.	10-6	3,5.10 <sup>-8</sup>	6,7.10 <sup>-7</sup>	8	8
2	Kolektor 2+3	1,7.10 <sup>-9</sup>	1,3.104	2,1.10 <sup>-7</sup>	5,8.10 <sup>-5</sup>	10	10
3	Izolátor 3/4	3,5.10-9		3,5.10 <sup>-9</sup>		2	1.10-4
4	Kolektor 4	1,6.10-6	8,1.10-6	1,2.10 <sup>-8</sup>	1,7.10-4	10	1.10-4

Tabulka 4-2: H	ydraulické	parametry	/ kali	brované	ho mod	lelu	u pod	le١	/aňl	ka (	201	4).
----------------	------------	-----------	--------	---------	--------	------	-------	-----	------	------	-----	-----

území adaptována pomocí váhového faktoru tak, aby hydrologická bilance modelového území vycházela správně.

Jako výchozí hodnoty hydraulických parametrů modelu byly použity kalibrované hydraulické vodivosti dle Vaňka (2014), protože tyto dobře souhlasí s hodnotami, obsaženými v databázi na území Saska a hodnotami uváděnými v literatuře (Mibus 1977, Herčík 2003). Hodnota horizontální hydraulické vodivosti kolektoru A však byla nahrazena hodnotou vodivosti 0,98\*10<sup>-5</sup>, převzatou z literatury (Mibus, 1977).

Tyto hodnoty byly během kalibrace upraveny tak, aby se simulované hodnoty hladiny podzemních vod co nejvíce blížily hodnotám naměřeným. Na tomto základě vzniklá zonace kalibrovaných parametrů.

Okrajové podmínky jednotlivých kolektorů, popsané v kapitole 4.2 pro dílčí území Lückendorf, byly definovány odpovídajícím způsobem. Okrajové podmínky 1. typu pro kolektor A na jihu a západě byly převzaty z modelu Vaňka (2014). V kolektoru BC byly použity okrajové podmínky podél vodních toků. Na základě stacionární konstrukce modelu zde byly implementovány průtoky (m<sup>3</sup>/d) jako okrajová podmínka 2. typu pro vodní toky Panenský potok, Hamerský potok a Heřmanický potok. Jak bylo popsáno v kapitole 3.4, byly tyto hodnoty zjišťovány v rámci sezónních kampaní měření.

Údaje k odběrům z vodárenských studní v území Lužických hor (Zittauer Gebirge) byly poskytnuty regionálními vodárenskými společnostmi jakožto dodavateli pitné vody a jsou součástí modelu jako okrajová podmínka 3. typu. Zohledněny přitom byly studny a vrty, uvedené v následující tabulce 4-3.

## Kalibrace

Kalibrace vodivostí na základě údajů z monitorovacích vrtů byla pro popsaný model provedena pomocí softwaru FEPEST společnosti DHI WASY. V modelovém území Lužické hory se na německé straně nachází celkem 430 výchozů (databáze výchozů na území Saska), z nichž 8 je osazeno měřícími body (monitorovacími vrty). Pro českou část území bylo pro model použito 7 monitorovacích vrtů, které jsou v níže uvedené tabulce uvedeny společně s německými monitorovacími vrty.

Na základě údajů z vrtů s průběžným měřením, které jsou uvedeny v tabulce 4-3, nelze formulovat věrohodné závěry o hydroizohypsách jednotlivých kolektorů pro celé modelové území. Jak je patrné z obrázku 4-14, především v severovýchodní části modelového území se nenacházejí žádné monitorovací vrty. Kromě toho je pro nejspodnější kolektor A k dispozici pouze jeden monitorovací vrt. V důsledku toho jsou výsledky simulace pro tuto část území, stejně jako pro nejnižší kolektor, zatíženy značnou nejistotou.

Označení profilu	Období měření	Stratigrafie
PL-1	1977	Turon
PL-2	1977	Turon
RH-1	1974	Turon
RH-2	1974	Turon – Coniac
RH-3	1974	Turon
RP-4	1974	Turon
RP-5	1973	Turon
LD-1/63	1970-2020	Cenoman – Turon
LD-3/77	2003-2020	Turon
LD-5E/77	2003-2020	Turon
LD-6/77	1998-2020	Turon
LD-2/77	2003-2020	Turon
Z-244z/78	1985-2020	Tercierní pánev
Z-708A3/83	1985-2020	Tercierní pánev
Z-712z/83	1985-2020	Tercierní pánev

#### Tabulka 4-3: Monitorovací vrty v modelovém území Lužické hory

Oproti tomu ve východní části řešeného území, tedy na území obce Lückendorf, se nachází dostatečné množství monitorovacích vrtů. K údajům z monitorovacího vrtu LD GWBr 1/63 bylo přihlédnuto pouze za účelem interního porovnání. Během kamerové kontroly,



Obr. 4-14: Kalibrační zóny a monitorovací vrty modelu proudění podzemní vody pro Lužické hory (DHI WASY 2020) provedené v rámci předcházejícího projektu GRACE, bylo totiž zjištěno jeho zanesení. Během kalibrace bylo s nižší váhou přihlédnuto k údajům z monitorovacích vrtů RH-2, RH-3 a Z-712z/83. Odchylka mezi naměřenými hodnotami a simulovanými hodnotami hladiny vody na těchto třech monitorovacích vrtech je větší než na ostatních monitorovacích vrtech, což lze vysvětlit jejich malou vzdáleností od příslušného vodního toku.

Na obrázku 4-14 jsou uvedeny kalibrační zóny laterální vodivosti, které jsou vymezeny podle větších tektonických poruch pískovců. Vliv těchto poruch na horizontální hydraulickou vodivost byl testován během kalibrace a tvoří tak jedno z těžišť detailního průzkumu (Pohle 2020).

Model pro Lužické hory byl kalibrován pro ustálený stav. V důsledku chybějícího průběžného měření průtoků ve vodních tocích v tomto území nebylo možno zpracovat vodní bilanci pro transientní model.

## Simulované proudění podzemní vody

Modelem proudění podzemní vody pro Lužické hory byly vypočteny hladiny podzemní vody pro dílčí území Lückendorf za rok 2019. V kolektorech A a BC proudí voda v řešeném území jižním a jihozápadním směrem. Podzemní voda v kolektoru D proudí ve spádu k jeho hranicím výskytu, kde přechází do kolektoru BC ve formě opětovné infiltrace nebo pramene.

Hydroizohypsy kolektoru BC ukazují na pouze nízký drenážní účinek drobných vodních toků na české a saské straně. Proudění podzemní vody je ovlivňováno především znělcovými sopouchy, tektonickou fragmentací území a příslušnými poruchami, které se proje-



Obr. 4-15: Zobrazení modelovaných hydroizohyps kolektoru A pro rok 2019. V oblasti území obce Oybin je patrný výrazný blok. vují velkým gradientem hydroizohyps a zvýšenými hladinami podzemní vody. Ve východní části území, v infiltrační oblasti kolektoru A, lze zvýšené hladiny podzemní vody zaznamenat rovněž v nadložním kolektoru BC. V této části zájmového území se mezi kolektorem B a C nevyskytuje žádný izolátor. Z tohoto důvodu je tento kolektor v Lužických horách souhrnně označován jako kolektor BC.

V jihovýchodní části českého území je kolektor A doplňován infiltrací z povrchu terénu. Podzemní voda zde proudí jižním a jihozápadním směrem. Ve východní části území proudí podzemní voda v kolektoru A z infiltračního území jižním směrem k Labi, kde však nedochází k odvodnění. Podzemní voda je zde kolektorem BC přiváděna na povrch terénu. Mapa hydroizohyps (obr. 4-15) zobrazuje popsané infiltrační oblasti ve východní části, jakož i poruchové zóny a vyzdvižené kry mezi Oybinem a Lückendorfem a na severu Lückendorfu. Pokles hladiny podzemní vody v údolí Bílého potoka (Weißbachtal) má viditelný vliv na kolektor A. Zde lze předpokládat drenáž v důsledku možné další poruchy. V západní části jsou hydroizohypsy výrazně ovlivněny poruchami, to však s ohledem na nízký počet monitorovacích vrtů nelze spolehlivě doložit.

## Výpočet přirozených zásob podzemní vody a využitelných zásob podzemní vody

Pro vyhodnocení využitelných zdrojů podzemní vody v Lužických horách, především pro dílčí území Lückendorf, byly vypočteny přírodní zdroje podzemní vody v modelovém území. Údaje o efektivní infiltraci byly převzaty z projektu KliWES, jak bylo uvedeno v kapitole 4.1.2, kde byly tyto údaje vypočteny pomocí hydrologického modelu ArcEGMO. Přírodní zdroje podzemní vody tak vyplývají z efektivní infiltrace a rozlohy povodí. Přirozené zdroje podzemní vody byly výpočtem vyčísleny na 263 mm (858 l/s) pro rok 2019. Jelikož bylo možno pro modelové území vytvořit pouze stacionární model podzemní vody, lze za spolehlivé považovat pouze výsledky kalibrovaného užívání podzemní vody (odběry v roce 2019 - 91 l/s). Výsledky nekalibrovaného využívání podzemní vody lze použít pro formulování závěrů o stavu hladin podzemní vody, pro závěry o vodní bilanci však nemají výpovědní hodnotu (DHI WASY 2020). Jak vyplývá z vyhodnocení simulovaných hladin podzemní vody pro odběry z roku 2019 na území obce Lückendorf, čerpané množství téměř nemá vliv na hladinu podzemní vody na vrtech 6/77 a 1/63. Nekalibrované užívání v podobě vodoprávně povolených odběrů před rokem 2018 v celém území (230 l/s) ukazuje, že došlo k výraznému poklesu hydroizohyps ve směru Petrovice na jihu a ve směru pramenů Bílého potoka (Weißbach) na severu území. Dostupné zdroje podzemní vody se tak pohybují mezi hodnotami obou případů užívání podzemní vody, které lze kvantitativně zjistit transientní kalibrací modelu. Pro obecné vyhodnocení byla efektivní infiltrace odhadnuta pomocí střední hodnoty nízkého odtoku z území podle Hölting & Coldewey (2009), která činí 350 l/s. Při současném odběru ve výši 91 l/s jsou v zájmovém území disponibilní zdroje podzemních vod ve výši 259 l/s.

## 4.4. Výsledky modelových simulací

## 4.4.1. Modelové scénáře

Výslednou etapou prací bylo využití vytvořených nástrojů, matematických hydraulických modelů pro simulace dalšího vývoje všech tří vodohospodářských struktur. K dispozici byly klimatické scénáře, které vycházejí z dat IPCC, založených na předpokladu trvalého oteplování minimálně do roku 2100. Po zadání takových teplotních změn do srážkoodtokových modelů můžeme připravit modelové předpovědi, které predikují pokles efektivní infiltrace. Tento pokles jde na vrub zvýšení hodnoty výparu a transpirace vegetačním pokryvem. V případě, že akceptujeme tyto pesimistické vize, bychom museli do hydraulických modelů zadat kontinuální a lineární pokles efektivních srážek. Taková situace je však zcela nereálná, protože v přírodě se žádný jev lineárně nevyvíjí. Po zvážení těchto faktů jsme se rozhodli realizovat vodohospodářskou prognózu pouze do roku 2048, což je podle našeho názoru nejzazší termín, kam lze s určitým stupněm věrohodnosti dohlédnout.

Jako vstup do modelových řešení jsme připravili následující scénáře sumarizované v následujících dvou tabulkách.

Scénáře 02 až 04 simulují stav, který by nastal při udržení současné intenzity odběrů a různé intenzity poklesu efektivních srážek.

Scénáře 08, 09 a 10 představují zátěžový test modelových struktur. Odpoví na otázku, jak se budou chovat v případě, že efektivní srážky budou v budoucnosti odpovídat dnešnímu dlouhodobému průměru, ale způsob využívání se zintenzivní. Výstupy kvantifikovaly důsled-ky simulovaného stavu na hladiny podzemní vody.

Pro každý ze scénářů byla sestavena mapa hladin podzemní vody v jednotlivých kolektorech s referenčními monitorovacími vrty. Všechny mapy jsou součástí zpráv za jednotlivé modely, v této publikaci uvádíme jen reprezentativní výběr, demonstrující charakteristické trendy vývoje. Na obr. 4-4 jsou zobrazeny stavy na konci modelového období v roce 2048, a sice jako snížení hladiny podzemní vody oproti výsledkům scénáře 1, který představuje aktuální stav odpovídající dnešním odběrům.

<b>C</b> = { = { X	Odběry a čerpání podzemních vod [l/s]			la filma en faran (m. la)	Popis výsledků, hlavní změna		
Scenar	Charakteristika ČR SR		SRN	Infiltrace [mm/rok]	vůči výchozímu stavu		
01	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány odběry z roku 2017	63.4	41.1	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou měsíční infiltrací pro každý kalendářní měsíc v období 1967-2017 (roční průměr 246.79 mm/rok)	Výchozí stav pro srovnání se scénáři 02 až 06.		
02	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány odběry z roku 2017	63.4	41.1	Pro rok 2018 byla použita průměrná měsíční infiltrace pro každý kalendářní měsíc v období 1967-2017, která se každý rok sníží o 2 mm/rok, tj. o 60mm za 30 let (roční průměr v pro rok 2048 186.79 mm/rok)	Vlivem snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu 51516006_1 (infiltrační oblast, rozvodnice mezi toky Kamenice a Křinice) klesne o 4,5 m a na vrtu V-7 (jímací území Hřensko) o 2,3 m.		
03	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány odběry z roku 2017	63.4	41.1	Pro rok 2018 byla použita průměrná měsíční infiltrace pro každý kalendářní měsíc v období 1967-2017, která se každý rok sníží o 3 mm/rok, tj. o 90 mm za 30 let (roční průměr v pro rok 2048 156.79 mm/rok)	Vlivem snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu 51516006_1 (infiltrační oblast, rozvodnice mezi toky Kamenice a Křinice) klesne o 6,2 m a na vrtu V-7 (jímací území Hřensko) o 3,9 m.		

#### Tab. 4-4 Modelové scénáře použité v oblasti Hřenska

<b>C</b> ośwóż	Odběry a čerpání podzemních vod [l/s]		In films on [many (mails]	Popis výsledků, hlavní změna		
Scenar	Charakteristika	ČR	SRN	innitrace [mm/rok]	vůči výchozímu stavu	
04	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány odběry z roku 2017	63.4	41.1	Pro rok 2019-2023 byla použita roční infiltrace 2013–2017 snížená o 5mm pro každý rok, pro každý rok v dalším pětiletém období byla měsíční infiltrace snížena o dalších 5mm, tj. o 30mm za 30 let	Vlivem snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu 51516006_1 (infiltrační oblast, rozvodnice mezi toky Kamenice a Křinice) klesne o 4,4 m a na vrtu V-7 (jímací území Hřensko) o 2,3 m.	
05	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány povolené odběry	109.5	70	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou měsíční infiltrací pro každý kalendářní měsíc v období 1967-2017 (roční průměr 246.79 mm/rok)	Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu 51516006_1 (infiltrační oblast, rozvodnice mezi toky Kamenice a Křinice) klesne o 2,5 m a na vrtu V-7 (jímací území Hřensko) o 7,3 m.	
06	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány povolené odběry	109.5	70	Pro rok 2019-2023 byla použita roční infiltrace 2013– 2017 snížená o 5 mm pro každý rok, pro každý rok v dalším pětiletém období byla měsíční infiltrace snížena o dalších 5 mm, tj. o 30 mm za 30 let	Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu 51516006_1 (infiltrační oblast, rozvodnice mezi toky Kamenice a Křinice) klesne o 6,2 m a na vrtu V-7 (jímací území Hřensko) o 9,0 m.	
07	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány odběry z roku 2017	63.4	41.1	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou roční infiltrací v období 1967-2017 (roční průměr 246.79 mm/rok)	Výchozí stav pro srovnání se scénáři 08 až 10.	
08	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány povolené odběry	109.5	70	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou roční infiltrací v období 1967-2017 (roční průměr 246.79 mm/rok)	Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu 51516006_1 (infiltrační oblast, rozvodnice mezi toky Kamenice a Křinice) klesne o 1,4m a na vrtu V-7 (jímací území Hřensko) o 5,9m.	
09	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány 85% povolené odběry	93.1	59.5	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou roční infiltrací v období 1967-2017 (roční průměr 246.79 mm/rok)	Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu 51516006_1 (infiltrační oblast, rozvodnice mezi toky Kamenice a Křinice) klesne o 0,75 m a na vrtu V-7 (jímací území Hřensko) o 3,5 m.	
10	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány 115 % povolené odběry	125.9	80.5	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou roční infiltrací v období 1967-2017 (roční průměr 246.79 mm/rok)	Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu 51516006_1 (infiltrační oblast, rozvodnice mezi toky Kamenice a Křinice) klesne o 2,0 m a na vrtu V-7 (jímací území Hřensko) o 8,5 m.	

Obr. 4-16 Mapové simulace vývoje hladiny podzemní vody vybraných modelových scénářů oblasti Hřenska



	Odběry a čerpání podz	zemních v	od [l/s]		Popis výsledků, hlavní změna		
Scenar	Charakteristika	ČR	SRN	Infiltrace [mm/rok]	vůči výchozímu stavu		
01	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány odběry z roku 2017	59.0	5.6	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou měsíční infiltrací pro každý kalendářní měsíc v období 1967-2017 (roční průměr 130.53 mm/rok)	Výchozí stav pro srovnání se scénáři 02 až 06.		
02	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány odběry z roku 2017	59.0	5.6	Pro rok 2018 byla použita průměrná měsíční infiltrace pro každý kalendářní měsíc v období 1967-2017, která se každý rok sníží o 1 mm/rok, tj. o 30mm za 30 let (roční průměr v pro rok 2048 100.53 mm/rok)	Vlivem snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu VP8505 (turon) klesne o 3,5 m a na vrtu VP8504 (cenoman) o 1,9 m.		
03	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány odběry z roku 2017	59.0	5.6	Pro rok 2018 byla použita průměrná měsíční infiltrace pro každý kalendářní měsíc v období 1967-2017, která se každý rok sníží o 3 mm/rok, tj. o 90mm za 30 let (roční průměr v pro rok 2048 70.53 mm/rok)	Vlivem snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu VP8505 (turon) klesne o 6,5 m a na vrtu VP8504 (cenoman) o 3,8 m.		
04	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány odběry z roku 2017	59.0	5.6	Pro rok 2019-2023 byla použita roční infiltrace 2013–2017 snížená o 5mm pro každý rok, pro každý rok v dalším pětiletém období byla měsíční infiltrace snížena o dalších 5mm, tj. o 30mm za 30 let	Vlivem snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu VP8505 (turon) klesne o 3,5 m a na vrtu VP8504 (cenoman) o 1,2 m.		
05	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány maximální zaznamenané odběry	92.9	12.0	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou měsíční infiltrací pro každý kalendářní měsíc v období 1967-2017 (roční průměr 130.53 mm/rok)	Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu VP8505 (turon) klesne o 0,2 m a na vrtu VP8504 (cenoman) o 0,4 m.		
06	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány maximální zaznamenané odběry	92.9	12.0	Pro rok 2019-2023 byla použita roční infiltrace 2013–2017 snížená o 5mm pro každý rok, pro každý rok v dalším pětiletém období byla měsíční infiltrace snížena o dalších 5mm, tj. o 30mm za 30 let	Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu VP8505 (turon) klesne o 6,6 m a na vrtu VP8504 (cenoman) o 4,1 m.		
07	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány odběry z roku 2017	59.0	5.6	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou roční infiltrací v období 1967-2017 (roční průměr 130.53 mm/rok)	Výchozí stav pro srovnání se scénáři 08 až 10.		
08	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány maximální zaznamenané odběry	92.9	12.0	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou roční infiltrací v období 1967-2017 (roční průměr 130.53 mm/rok)	Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu VP8505 (turon) klesne do 0.1 m, na vrtu VP8504 (cenoman) do 0.1 m, na vrtu VP8456 o 1.3 m (turon) a na vrtu VP8455 (cenoman) o 5.2 m.		

## Tab. 4-5 Modelové scénáře použité v oblasti Děčínského Sněžníku

C - ( - / X	Odběry a čerpání podzemních vod [l/s]			In filture on France (walk)	Popis výsledků, hlavní změna	
Scenar	Charakteristika	ČR	SRN	innitrace [mm/rok]	vůči výchozímu stavu	
09	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány 85% povolené odběry	80.0	10.2	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou roční infiltrací v období 1967-2017 (roční průměr 130.53 mm/rok)	Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu VP8505 (turon) klesne do 0.1 m a na vrtu VP8504 (cenoman) do 0.1 m, na vrtu VP8456 (turon) o 1.1 m a na vrtu VP8455 (cenoman) o 3.3 m.	
10	Pro predikci v letech 2018–2048 uvažovány 115 % povolené odběry	106.8	13.8	Modelová infiltrace podle výsledků modelu BILAN s průměrnou roční infiltrací v období 1967-2017 (roční průměr 130.53 mm/rok)	Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu VP8505 (turon) klesne do 0.1 m a na vrtu VP8504 (cenoman) o 0.15 m, na vrtu VP8456 (turon) o 1.5 m a na vrtu VP8455 (cenoman) o 7.6 m.	

## 4.4.2. Modelové scénáře pro modelové území Lückendorf

Pro stacionární model proudění podzemní vody v území Lückendorf bylo simulováno 10 scénářů pro různé odběry a efektivní infiltraci. Údaje o infiltraci byly převzaty ze Saského hydrologického portálu (KliWES) (viz kap. 4.2.2.). Z tohoto portálu lze stáhnout datové sady klimatické projekce WEREX V, adaptované pro Sasko a selektované podle požadavků uživatele. Klimatické scénáře, použité pro dílčí území Lückendorf (WEREX 11, WEREX 77 a WEREX Medián), tvoří možný rozsah očekávatelného vývoje klimatu, přičemž WEREX 11 představuje menší změnu a WEREX 77 větší změnu teploty. WEREX Medián představuje střední hodnotu projekcí WEREX, dostupných na Hydrologickém portálu Saska a je nutno jej tedy chápat jako střední změnu teploty. Nárůst teploty, který lze z popsaných klimatických scénářů odvodit, byl zahrnut do použitého numerického modelu hydrologického režimu půdní vody Hydrologického portálu Saska, přičemž hydrologické prvky modelového území byly definovány s přihlédnutím k srážkoodtokovému modelu a využití krajiny. Z toho vyplývající míra efektivní infiltrace byla do modelu zadána jako horní okrajová podmínka popsaných klimatických scénářů pro roky 2038 a 2047. Na základě projektovaného vývoje teploty a srážek byl rok 2038 zvolen jako "suchý rok". Rok 2047 byl oproti tomu vybrán jako "vlhký rok". Projekce zde totiž vychází z nižšího nárůstu teploty a nižšího poklesu srážkového úhrnu. Dále byly hodnoceny různé scénáře odběrů podzemní vody, které byly definovány na základě schváleného průměrného odběru, schváleného maximálního odběru a aktuální hodnoty odběru podzemní vody v roce 2019.

Souhrnné simulované scénáře pro rok 2038, uvedené v tabulce 4-8, vyplynuly z následně shrnutých vstupních scénářů.

- Scénář 01 popisuje jako referenční scénář aktuální stav odběrů podzemní vody v roce 2019 ve spojení s dlouhodobou, střední měsíční infiltrací.
- Scénáře 02 až 04 simulují vývoj v případě konstantních (současných) odběrů podzemní vody s variabilní intenzitou infiltrace (WEREX 11, 77, Medián).
- **Scénáře 05 až 07** vycházejí z vodoprávně povolených, průměrných odběrů podzemní vody s variabilní intenzitou infiltrace (WEREX 11, 77, Medián).





Obr. 4-17 Mapové simulace vývoje hladiny podzemní vody vybraných modelových scénářů oblasti Děčínského Sněžníku  Scénáře 08, 09 a 10 představují zátěžový test struktury modelu a popisují příslušný vývoj pro případ, že infiltrace bude odpovídat klimatickým scénářům (WEREX 11, 77, Medián) a využití podzemní vody 110% povolených odběrů.

Výsledky scénářů mají kvantifikovat simulovaný vývoj hladiny podzemní vody a možné změny ve srovnání s výchozím stavem. Pro odběry v roce 2019 byla zpracována pouze stacionární kalibrace. Všechny scénáře, které se liší od popsaného výchozího stavu, proto vypovídají pouze o změnách hladiny podzemní vody, nikoliv však o změnách vodní bilance.

Na základě scénářů simulovaných let 2038 a 2047 byla pro každý jednotlivý kolektor vypracována mapa stavu hladiny podzemní vody a mapy rozdílů oproti referenčnímu scénáři. Mapy jsou součástí zprávy o modelování pro Lückendorf (Pohle 2020). V této publikaci je zobrazen reprezentativní výběr map a scénářů pro rok 2038 jako příklad charakteristických trendů vývoje. Na obr. 4-18, 4-19 a 4-20 jsou zachyceny poklesy hladiny podzemní vody v roce 2038 pro scénáře 02 a 05 ve srovnání se scénářem 01 (aktuální stav současných odběrů).

C o ź w ź ž	Odběry a čerpání podzemních vod [l/s]			In filture on finante (via bi	Výsledky a změny vůči		
Scenar	Charakteristika	ČR	Sasko	innitrace [mm/rok]	výchozímu stavu		
01	Odběry v roce 2019	9,79	81,99	Modelová infiltrace podle skutečných výsledků modelu KliWES s průměrnou roční infiltrací pro rok 2019 (roční průměr 263 mm/rok).	Výchozí stav pro srovnání se scénáři		
02	Obdobně jako scénář 01	9,79	81,99	Modelová infiltrace podle výsledků WEREX11 modelu KliWES s průměrnou roční infiltrací pro rok 2038 (roční průměr 120,59 mm/rok).	Vlivem snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu LD – 6/77 klesne o 7,51 a na vrtu LD – 2/77 o 28,28 m ve srovnání s referenční hodnotou. Hladina podzemní vody na vrtu LD – 2/77 klesne pod nejnižší měřitelný stav.		
03	Obdobně jako scénář 01	9,79	81,99	Modelová infiltrace podle výsledků WEREX77 modelu KliWES s průměrnou roční infiltrací pro rok 2038 (roční průměr 53,61 mm/rok).	Vlivem snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu LD – 6/77 klesne o 56 m a na vrtu LD – 2/77 o 57 m ve srovnání s referenční hodnotou. Hladina podzemní vody na obou vrtech klesne pod nejnižší měřitelný stav.		
04	Obdobně jako scénář 01	9,79	81,99	Modelová infiltrace podle výsledků WEREX MEDIÁN modelu KliWES s průměrnou roční infiltrací pro rok 2038 (roční průměr 72,24 mm/rok).	Vlivem snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu LD – 6/77 klesne o 45 m a na vrtu LD – 2/77 o 46 m ve srovnání s referenční hodnotou. Hladina podzemní vody na obou vrtech klesne pod nejnižší měřitelný stav.		

#### Tab. 4-8: Přehled o modelových scénářích použitých v modelovém území Lückendorf

	Scénář Odběry a čerpání podzemních vod [l/s] Charakteristika ČR Sasko			Výsledky a změny vůči		
Scenar			Infiltrace [mm/rok]	výchozímu stavu		
05	Povolené průměrné odběry	10,53	221,53	Obdobně jako scénář 02	Vlivem vyšších odběrů a snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu LD – 6/77 klesne o 44 m a na vrtu LD – 2/77 o 47 m ve srovnání s referenční hodnotou. Hladina podzemní vody na obou vrtech klesne pod nejnižší měřitelný stav.	
06	Obdobně jako scénář 05	10,53	221,53	Obdobně jako scénář 03	Vlivem vyšších odběrů a snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu LD – 6/77 klesne o 74 m a na vrtu LD – 2/77 o 77 m ve srovnání s referenční hodnotou. Hladina podzemní vody klesne pod nejnižší měřitelný stav, čímž se stanou oba vrty suchými.	
07	Obdobně jako scénář 05	10,53	221,53	Obdobně jako scénář 04	Vlivem vyšších odběrů a snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu LD – 6/77 klesne o 63 m a na vrtu LD – 2/77 o 66 m ve srovnání s referenční hodnotou. Tím hladina podzemní vody klesne pod nejnižší měřitelný stav, čímž se stanou oba vrty suchými.	
08	Povolené maximální odběry	16,20	244,68	Obdobně jako scénář 02	Vlivem vyšších odběrů a snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu LD – 6/77 klesne o 48 m a na vrtu LD – 2/77 o 51 m ve srovnání s referenční hodnotou. Tím hladina podzemní vody klesne pod nejnižší měřitelný stav, čímž se stanou oba vrty suchými.	
09	Obdobně jako scénář 08	16,20	244,68	Obdobně jako scénář 03	Vlivem vyšších odběrů a snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu LD – 6/77 klesne o 77 m a na vrtu LD – 2/77 o 81 m ve srovnání s referenční hodnotou. Tím hladina podzemní vody klesne pod nejnižší měřitelný stav, čímž se stanou oba vrty suchými.	
10	Obdobně jako scénář 08	16,20	244,68	Obdobně jako scénář 04	Vlivem vyšších odběrů a snížené infiltrace hladina podzemní vody na vrtu LD – 6/77 klesne o 66 m a na vrtu LD – 2/77 o 70 m ve srovnání s referenční hodnotou. Tím hladina podzemní vody klesne pod nejnižší měřitelný stav, čímž se stanou oba vrty suchými.	



Obr. 4-18: Snížení hladiny podzemní vody v území Lückendorf pro rok





# 5 Závěry

Cílem studie bylo posoudit vodohospodářský potenciál přeshraničního česko-saského pomezí. Důraz byl kladen především na zhodnocení strategických zdrojů podzemních vod v podmínkách zvyšujících se nároků na zajištění zdrojů pitných vod v období klimatických extrémů. Nástrojem k dosažení tohoto cíle byl komplex geologických, hydrologických a hydrogeologických metod. Ten umožnil ve třech pilotních lokalitách- Děčínský Sněžník, Hřensko a Lückendorf – vyvinout hydraulické 3D modely. Tyto nástroje umožnily výpočet využitelných zdrojů podzemních vod a simulovat různé scénáře dalšího rozvoje využívání.

- Pro vstupní konceptuální model byl na všech pilotních lokalitách realizován podrobný geologický i hydrologický průzkum, zahrnující i realizaci hlubokých hydrogeologických vrtů.
- Na základě získaných poznatků byly sestaveny nejprve modely ve stacionárním a později i v transientním režimu. Po jejich kalibraci byly využity pro splnění zadaného cíle.
- Přírodní zdroje na území Hřenska byly modelem ověřeny na 1481 l/s. Využitelné množství, které zajistí nepřetížení hydrogeologické struktury, činí 623 l/s. Při současných odběrech ve výši 105 l/s je tedy rezerva 518 l/s.
- Modelový zátěžový test prokázal, že v oblasti Hřenska by bylo možné zvýšit čerpání maximálních povolených odběrů až na 115%, to je na české straně na 125,9 l/s a současně na německé straně na 80,5 l/s i za snížené infiltrace, tedy v suchých obdobích. Vlivem vyšších odběrů hladina podzemní vody na vrtu 51516006\_1 v infiltrační oblasti na rozvodnici mezi toky Kamenice a Křinice, klesne o 2,0 m a na vrtu V-7 v jímacím území Hřensko klesne o 8,5 m.
- Přírodní zdroje území Děčínského Sněžníku byly modelem ověřeny na 130 mm za rok, což odpovídá 724 l/s. Využitelné množství, které zajistí nepřetížení hydrogeologické struktury, činí 321 l/s. Při současných odběrech ve výši 78 l/s jsou disponibilní zdroje podzemní vody 243 l/s.
- Modelový zátěžový test prokázal, že by v oblasti Děčínského Sněžníkubylo možné zvýšit čerpání maximálních povolených odběrů až na 115%, to je na české straně na 106,8 l/s a současně na německé straně na 13,8 l/s i za snížené infiltrace, tedy v suchých obdobích. Hladina podzemní vody v takovém případě klesne na vrtu VP8505 (turon) klesne do 0.1 m a na vrtu VP8504 (cenoman) o 0.15 m, na vrtu VP8456 (turon) o 1.5 m a na vrtu VP8455 (cenoman) o 7.6 m.
- Přírodní zdroje podzemní vody v dílčím území Lückendorf byly modelem ověřeny na 263 mm za rok 2019, což odpovídá 858 l/s. Využitelné množství, které zaručí, že hydrogeologické struktury nebudou přetíženy, činí 350 l/s. U současných odběrů podzemní vody ve výši 91 l/s činí disponibilní zdroje podzemní vod 259 l/s.

Vyhodnocení změn hladiny podzemní vody dle modelovaných zátěžových testů pro roky 2038 a 2047 (scénáře 03 až 10) ukazuje, že by v roce 2038 v dílčím území Lückendorf nebylo možné čerpat povolené odběry (před rokem 2018) resp. je zvýšit. V takovém případě klesne hladina podzemní vody na vrtu LD – 6/ 77 (turon) a na vrtu LD – 2/77 (turon) pod nejnižší měřitelnou hodnotu a pod filtr vrtu 1/48.

## Slovníček pojmů

Jedním z výstupů projektu byl výkladový slovník nejdůležitějších odborných termínů v oblasti geologie, hydrogeologie a vodního hospodářství zahrnující více než 400 výrazů. Cílem tohoto volně dostupného slovníku na webových stránkách projektu je zajistit jednotné chápání používaných termínů jak mezi odbornou, tak i laickou veřejností. Slovník je trojjazyčný a umožní zájemci získat nejen informaci o smyslu a významu každého z termínů, ale i česko-německo-anglické ekvivalenty.

Následující přehled představuje výtah nejběžnějších hydrogeologických výrazů a jejich vysvětlení v rozsahu usnadňujícím čtenáři orientaci v textu.

- artéská podzemní voda | Podzemní voda s piezometrickou hladinou nad povrchem terénu.
- bariéra hydraulická | Tyto bariéry rozdělujeme na negativní a pozitivní. V obou případech dochází k umělému ovlivnění hladiny podzemní vody tak, aby došlo ke změně směru proudění podzemní vody a vytvoření umělé rozvodnice.
- báze erozní | Dno nejhlubšího údolí, které je odvodňovací úrovní určité širší oblasti s trvalým odtokem (zpravidla je to řeka).
- báze odvodnění podzemních vod | Místo, k němuž odtékají podzemní vody určitého zvodněného systému a kde vystupují na povrch, resp. do povrchových toků. Přírodními bázemi odvodnění podzemních vod jsou zpravidla údolí povrchových toků. Místní báze odvodnění podzemních vod se potom kryje s místní erozní bázi.
- bilance hydrologická | Porovnání přírůstků a úbytků vody a změn vodních zásob povodí, území nebo vodního útvaru za daný časový interval.
- bilance podzemní vody | Kvantitativní vztah mezi prvky, určujícími změnu zásoby podzemní vody za dané časové období v uvažovaném území.
- čára průtoků | Čára znázorňující časový průběh průtoku v určitém profilu.
- čára rozdělení četností | Grafické zobrazení četností výskytu hodnot hydrologického prvku.
- čára výtoková | Čára poklesu průtoků v období bez srážek, kdy je tok napájen pouze podzemní vodou.
- deprese hladiny | Snížení hladiny podzemní vody pod přírodní piezometrickou hladinu následkem umělého zásahu do zvodně (odběru vody ze zvodně).
- doba zdržení | U podzemní vody doba, po kterou se podzemní voda zdrží v uvažované části litosféry.
- dotace podzemní vody | Objem vody, který je přímo nebo nepřímo přenesen do kolektoru podzemní vody.
- efektivní pórozita | Množství otevřených pórů, skrz které může proudit medium. Vyjadřuje se jako podíl objemu otevřených pórů a celkového objemu porézního materiálu včetně průlin.
- efektivní srážky | Část srážek, která se účastní odtokového procesu.

hladina dynamická | Hladina vody ve vrtu anebo studni snížená v důsledku odběru z tohoto vrtu či studny anebo zvýšená v důsledku nalévání anebo vtláčení do tohoto vrtu či studny.

hladina podzemní vody | Horní rozhraní nasycené zóny, nad kterým je atmosférický tlak.

- hloubka hladiny podzemní vody | Vzdálenost mezi povrchem terénu a hladinou podzemní vody.
- hranice nepropustná | Jako nepropustná hranice se označuje boční hranice zvodně, přes kterou dochází pouze k zanedbatelně malému průtoku podzemní vody.
- hydraulický gradient | V porézním prostředí: míra změny hydraulické výšky na jednotku vzdálenosti ve směru proudění podzemní vody.
- infiltrace | Pronikání vody ze zemského povrchu do půd a hornin.
- infiltrace břehová | Pronikání povrchových vod z nádrží nebo toků do hydrogeologických kolektorů pod vlivem hydraulického gradientu.

infiltrační oblast | Území v hydrogeologické struktuře, kde dochází k infiltraci.

- izolátor | Horninové těleso s výrazně (řádově) nižší propustností než je propustnost horninového prostředí v bezprostředním sousedství.
- karotáž | Geofyzikální průzkum ve vrtech.
- koeficient filtrace | Koeficient filtrace se číselně rovná filtrační rychlosti při jednotkovém hydraulickém gradientu.
- koeficient volné zásobnosti | Objem vody, uvolněný ze statické zásoby hranolu kolektoru jednotkové základny při jednotkovém poklesu hladiny. Týká se kolektoru s volnou hladinou.
- kolektor | Horninové těleso s výrazně vyšší propustností než je propustnost bezprostředně sousedícího horninového prostředí.
- křivka depresní | Průsečnice svislé roviny s depresní plochou podzemního proudu ve směru jeho pohybu.
- kužel depresní | Prostor snížení hladiny podzemní vody při odběru ze studny nebo z vrtu s plošně radiálním přítokem.
- mocnost zvodně | Vertikální vzdálenost mezi vrchní a spodní hranicí zvodně.
- model numerický | Zpracovává a vyjadřuje hydrogeologické poměry určitého celku pomocí počítačového programu. Vychází z konceptuálního modelu, ze zhodnocení geometrie a anatomie hydrogeologických těles.
- model konceptuální | Výsledek interpretace hydrogeologických a souvisejících geologických, geomorfologických, hydrochemických a klimatických poměrů hydrogeologického celku, včetně stanovení okrajových podmínek.
- nenasycená zóna | Část geologického prostředí, ve které jsou póry částečně zaplněné vodou a částečně vzduchem.
- objem puklin | Objem definovaný délkou a otevřenosti puklin.
- odtok celkový | Souhrn všech složek odtoku procházejícího závěrovým profilem za daný časový interval.
- odtok hypodermický | Složka celkového odtoku, která stéká do koryta toku v bezprostřední vrstvě pod povrchem povodí, aniž by dosáhla hladiny podzemní vody.
- odtok podzemní | Objem podzemní vody, která odtekla z povodí nebo z jiného územního celku za časovou jednotku.
- odtok povrchový | Složka celkového odtoku, která odtéká z povodí do sítě vodních toků po povrchu terénu.
okrajové podmínky zvodněného systému | Hydraulické podmínky, kterými se řídí výměna vody mezi zvodněným systémem a jeho okolím.

podzemní voda | Voda, která se vyskytuje pod zemským povrchem.

podzemní voda s napjatou hladinou | Podzemní voda v kolektoru, který je shora i zdola omezen nepropustným prostředím.

- podzemní voda s volnou hladinou | Podzemní voda s hladinou, která je rozhraním mezi nasycenou a nenasycenou zónou.
- pórovitost efektivní | Podíl pórového prostoru, efektivního pro pohyb vody, na celkovém objemu horniny.

povodí | Území, odkud odtéká voda do uvažovaného profilu vodního útvaru.

povodí hydrogeologické | Území, ze kterého odtéká podzemní voda k uvažovanému profilu; často se nekryje s povodím povrchové vody.

propustnost | Schopnost horniny propouštět tekutiny účinkem hydraulického gradientu.

propustnost puklinová | Schopnost horniny propouštět puklinami tekutiny pod vlivem hydraulického gradientu.

proudění laminární | Proudění, při kterém jsou trajektorie částic tekutiny zhruba rovnoběžné.

proudění neustálené | Proudění, při kterém se vektor rychlosti v daném bodě mění s časem. proudění turbulentní | Proudění, při kterém nejsou trajektorie jednotlivých částic rovno-

běžné, chaoticky se proplétají a částečky kapaliny na rozdíl od laminárního proudění přecházejí z jedné vrstvy do druhé. Vzniká při větších rychlostech proudění.

průměrný roční odběr | Průměrná výše odběru pro určité víceleté období.

průměrný roční srážkový úhrn | Průměrné množství srážkové vody, spadlé za jeden rok. Průměr se stanoví pro určité víceleté období.

průtočnost | Míra schopnosti zvodněného kolektoru určité mocnosti propouštět vodu s danou kinematickou viskozitou. Součin koeficientu filtrace a zvodněné mocnosti.

průtok | Objem protékající za jednotku času.

půdní vlhkost | Procentuální podíl vody v půdě, vyjádřený na základě hmotnosti sušiny nebo objemu.

rajon hydrogeologický | Hydrogeologicky jednotné území vymezené k vodohospodářským nebo jiným účelům.

režim podzemní vody | Souhrn zákonitostí změn kvantitativních a kvalitativních prvků podzemních vod v čase a prostoru.

rozvodnice | Myšlená hranice mezi sousedními povodími.

rychlost proudění | Vektor určující rychlost a směr v určitém bodě pohybujícího media, např. vody.

- snížení hladiny podzemní vody | Rozdíl mezi původní (přírodní, odběrem neovlivněnou) úrovní piezometrické (výtlačné nebo volné) hladiny podzemní vody a úrovní hladiny ovlivněné odběrem podzemní vody.
- specifická storativita | Změna objemu vody v jednotce objemu porézního prostředí pří jednotkové změně tlakové výšky.

specificky odtok | Objem vody odtékající z jednotkové plochy povodí za jednotku času.

specifický odtok podzemní | Objem podzemní vody odtékající z jednotkové plochy povodí podzemní vody za jednotku času. Udává se v l/s/km2.

stáří podzemní vody | Doba, po kterou setrvala částice podzemní vody meteorického původu

v zemské kůře od momentu přirozené infiltrace do okamžiku odběru vzorku vody obsahující tuto částici.

- struktura hydrogeologická | Část geologického prostředí, v níž nastává souvislý oběh podzemní vody.
- úroveň hladiny | Svislá vzdálenost hladiny od určitého odměrného bodu (například od mořské hladiny).
- vydatnost /specifická vydatnost | Množství povrchové nebo podzemní vody vyvěrající (odebírané) za jednotku času./ Množství podzemní vody odebírané za jednotku času při jednotkovém snížení hladiny.
- využitelné množství podzemní vody | Množství podzemní vody, které lze získávat jímacími zařízeními racionálními z technickoekonomického hlediska při daném režimu využití a při vyhovující kvalitě vody během uvažovaného období využití.

## Použitá literatura

- Bernhofer C., Pluntke T., Barfus C., Heidenreich M., Kronenberg R., Hauffe C., Wagner M., Schwarze R. a Gutzmann B. (2019): Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlage im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes. Schriften-reihe, Heft 7/2019. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Dresden.
- Burda J. (1998): Hydrogeologická mapa ČR. List 03-13 Hrádek nad Nisou. Měřítko 1 : 50 000. Český geologický ústav. Praha.
- Burda J., Venera Z. et al. (2016): ID EIS 10051606-SFŽP Rebilance zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva. Příloha č. 2/41. Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon 4630 Děčínský Sněžník. – ČGS.
- Diersch H.-J.G. (2013): FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. 10.1007/978-3-642-38739-5.
- DHI WASY (2020): Beratung zum Grundwassermodell ResiBil Etappe 4 Kalibrierung, Sensitivitäts – und Szenarienanalyse. DHI WASY, 08.10.2020. Berlin.
- Eckhardt P. (2013): Vývoj vydatnosti pramenů a pramenných oblastí v oblasti Hřensko-Křinice/Kirnitzsch. Závěrečná zpráva. – VÚV TGM, Praha.
- Hanel M., Vizina A., Máca P., Pavlásek J. (2012) A Multi-Model Assessment of Climate Change Impact on Hydrological Regime in the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 60(3), 152-161. doi: https://doi.org/10.2478/v10098-012-0013-4.
- Harbaugh A.W. a McDonald M.G. (1996): User's documentation for MODFLOW- 96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model, USGS Open-File Report 96-485.
- Hauffe C., Müller R., Winkler P., Baldy A., Schwarze R. a Schütze N. (2016): Strategie zur Kalibrierung großräumiger Wasserhaushaltsmodelle sowie Ergebnisse für Ist-Zustand und Klimasze-narien in Sachsen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 1 (2016).
- Harbaugh A. W. a McDonald M. G. (1996): User's documentation for MODFLOW- 96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model, USGS Open-File Report 96-485.
- Hazdrová M., Jetel J., Daňková H., Kněžek M., Kulhánek V., Trefná E. (1980): Vysvětlivky k Základní hydrogeologické mapě ČSSR 1 : 200 000 list 02 Ústí nad Labem. Ústř. úst. geol. Praha.
- Herčík F., Nakládal V. (1987): Hydrogeologická syntéza české křídové pánve BILANČNÍ CELEK 3, Stavební geologie n.p. Praha.
- Herčík F., Hermann Z., Valečka J. (1999): Hydrogeologie české křídové pánve. Český geologický ústav, Praha.

- Hölting, B. a Coldewey, W. (2009): Hydrogeologie Einführung in die Allgemeine und Angewand-te Hydrogeologie. 10.1007/978-3-662-59667-8.
- Horáček S., Kašpárek L., Novický O. (2008): Estimation of climate change impact on water resources by using Bilan water balance model. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 4, 012023.
- Hrazdíra P. (1998): Hydrogeologická mapa ČR. List 02-22, 03-11 Varnsdorf. Měřítko 1 : 50 000. Český geologický ústav. Praha.
- Jetelová D. (1972): Regionální hydrogeologický průzkum v povodí Ploučnice, Kamenice a Křinice. Stavební geologie n.p., Praha.
- Kadlecová R. et al. (2015): Rebilance zásob podzemních vod rozšířený abstrakt. Bericht, Česká geologická služba, 18 S., Praha.
- Kahnt R., Löser R., Gabriel A., Hermann D., Renker S., Helbig M. a Kutzke A. (2014): Ab-schlussbericht Entwicklung zweier 3D-Modelle hydrogeologischer Körper im sächsisch-böhmischen Grenzgebiet im Rahmen des Ziel 3-Projektes GRACE. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Fre-iberg/Halsbrücke.
- Kalinová M., Eckhardt P., Martínková M., Šimek P., Bílý M., Koubková L., Böhm A.-K., Börke P. a Schulz C. (2014a): Grundwasserressourcen im Tschechisch-Sächsischen Grenzraum II. Gebiet Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin.- Ergebnisse des EU-Projektes "Gemeinsam genutzte Grundwasserressourcen im tschechisch-sächsischen Grenzgebiet (GRACE)", Wasserforschungsinsti-tut T. G. Masaryk, Prag; Sächsisches Landesamt f. Umwelt, Landwirtschaft, Geologie, 91 S., Dre-sden/Freiberg.
- Krentz O. & Rommel A. (2020): Das Zittauer Gebirge im Kreuzungsbereich der Elbezone und des Egergrabens – Tektonik und Strukturbau – Geologisch-geophysikalische Ergebnisse aus dem EU-Projekt ResiBil. Geoprofil LfULG, Heft XX/2020, (eingereicht).
- Krentz O. a Staněk K. (2015): Die Lausitzer Überschiebung zwischen Meißen und Jeschken – neue Aspekte. – Bericht der Naturforschenden Gesellschaft der Oberlausitz, Band 23, Seite 123 – 137, Görlitz.
- Kačura G. (1990): Hydrogeologická mapa ČR. List 02-23 Děčín. Měřítko 1 : 50 000. Český geologický ústav. Praha.
- Kahnt R., Löser R., Gabriel A., Hermann D., Renker S., Helbig M., Kutzke A. (2014): Abschlussbericht Entwicklung zweier 3D-Modelle hydrogeologischer Körper im sächsisch-böhmischen Grenzgebiet im Rahmen des Ziel 3-Projektes GRACE, G.E.O.S., Halsbrücke. Mibus, H.-P. (1978): Hydrogeologischer Ergebnisbericht mit Grundwasservorratsberechnung – De-tailerkundung Lückendorf. Dresden. 58 Seiten [138 Blatt]: 9 Anl. – 8 Lit. – Ergebnisbericht, Erkun-dungsbericht. – unveröffentlicht.
- Mibus H.P. (1998): Modell Übersichtsgutachten des Grundwasserdargebotes und dessen Nutzung im Zittauer Gebirge unter Berücksichtigung der Grundwassernutzungen auf tschechischem Gebiet. – Gutachten im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. G.E.O.S. Ingenieur-gesellschaft mbH, 68 S. + Anlagen. Freiberg/Halsbrücke.
- Mlčoch B., Krentz O., Nadaskay R., Valečka J., Mrázová Š., Junge R., Reinhardt S. & Pohle M. (2018): Geologische Karte des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens/Geologická mapa sasko-české křídové pánve M 1:100 000. – Czech Geological Survey, Prague; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden/Freiberg.
- Mrázová S., Tomanová Petrová, P. & Krentz O. (eds.) (2020): Geologie des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens zwischen Erzgebirge und Jeschken. – Ergebnisse des

EU-Projektes "Wasserres-sourcenbilanzierung- und resilenzbewertung im Ostteil des sächsisch-böhmischen Grenzraumes (Re-siBil)". Czech Geological Survey, Wasserforschungsinstitut T. G. Masaryk, Prag; Sächsisches Lande-samt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden/Freiberg, 103 S., Prag.

Nádaskay R (2020): (Hydro)geologie. – Roll up; Wanderausstellung Projekt ResiBil; https:// www.resibil.sachsen.de/downloads-4111.html; 28.08.2020, 09:57 Uhr.

- Nakládal V. (1975): Tlustecký blok hydrogeologický průzkum. Zpráva z 1. etapy a ideový projekt II. etapy, Stavební geologie, Praha.
- Nakládal V. (1989): Hřensko prameniště. Zpráva o výsledcích geologickoprůzkumných prací. Stavební geologie. Praha.
- Navrátilová V., Nol O. (2019a): Hřensko-Křinice. Transientní model podzemní vody (II). Závěrečná zpráva za 2. etapu prací.
- Navrátilová V., Nol O. (2019b): Děčínský Sněžník. Transientní model podzemní vody (II). Závěrečná zpráva za 2. etapu prací. Aquatest. Praha.
- Nol O. (2014): Společně využívané vody na česko-saském pomezí (GRACE). Matematický model proudění podzemní vody v oblasti Hřensko–Křinice/Kirnitzsch. Aquatest. Praha.
- Patzeltová B., Patzelt Z. (2004): Požadavky na vstupní data pro matematické modelování proudění podzemních vod a transportu kontaminantů. – Sborník Ekomonitor.
- Pohle M. (2020): Dokumentation Grundwassermodell Zittauer Gebirge. Sächsisches Landesamt f. Umwelt, Landwirtschaft, Geologie. Dresden (in Präparation).
- Procházka M. (2017): Karotážní měření pro objasnění geologické stavby a hydrodynamických poměrů v nových pozorovacích vrtech RE001,RE002. Aquatest. Praha. Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Nr. 194, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- Rösner S., Szymczak P., Höhn R. (2008) Zustandsüberwachung Grenzgrundwasser/ Operatives Messnetz. G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH. Freiberg.
- Schwarze R., Dröge W., Hofmann J., Maleska V., Lünich K., Schönfeld M. a Spitzer S. (2011): KliWES – Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer Teil 1: Wasserhaushalt, Kernkomponente – LfULG Schriftenreihe, Heft 44/2011.
- Schwarze R., Gurova A., Röhm P., Hauffe C., Baldy A., Winkler P., Müller R., Dröger W. a Wagner M. (2016): Analyse möglicher Änderungen des Wasserhaushalts sächsischer Gewässerein-zugs-gebiete unter dem Einfluss variierender Klima- und Landnutzungsbedingungen. Schriftenreihe, Heft 8/2016. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Dresden.
- Schwarze R., Hauffe C., Baldy A. a Wagner M. (2014): Regionalisierung meteorologischer Stati-onsdaten mit einem geeigneten Regionalisierungstool im Rahmen des FuE-Projekts KliWES – Kli-mawandel und Wasserhaushalt (Klimaprojektionen). Endbericht, (Hrsg.) Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Dresden.
- Sedlák J., Skácelová Z., Mlčoch B. a Krentz O. (2019): Gravimetrická mapa hraniční oblasti Saska a České republiky/Gravimetrische Übersichtskarte im Grenzgebiet Sachsen-Tschechische Repub-lik M 1:100 000. – Miligal s.r.o., Brno; Czech Geological Survey, Prague; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden/ Freiberg.

- Tallaksen L.M., van Lannen H.A.J. (2004): Hydrological Drought Process and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Elsevier, Amsterdam.
- Vaněk J. (2013): Společně využívané vody na česko-saském pomezí (GRACE) Matematický model proudění podzemní vody v oblasti Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin 1. etapa. AQUATEST. Prag.
- Vaněk (2014): Gemeinsam genutzte Grundwasserressourcen im tschechisch-sächsischen Grenzgebiet (GRACE) – Mathematisches Modell der Grundwasserströmung im Gebiet Pe-trovice – Lückendorf – Jonsdorf – Oybin 2. Etappe. AQUATEST. Prag.
- Vizina A., Horáček S. a Hanel M. (2015): Recent developments of the BILAN model. Water Management Technical and Economical Information Journal, 2015, vol. 57, No. 4–5, p. 7–10. ISSN 0322-8916.
- Voigt T., Franke J. a Franke S. (2013): Grundlagen für ein geologisch-tektonisches Modell der Kreideablagerungen im Sächsich-Böhmischen Grenzbereich im Rahmen des Ziel 3 Projektes GRACE. Abschlussbericht. Jena.
- Wenderholm S., Gabriel A. Kutzke A. (2019): Anpassung und Bereitstellung von 3D-Strukturdaten in FEFLOW-kompatiblem volumenbasierten Datenformat auf der Grundlage der laufenden Bearbeitung der Hydrogeologischen Spezialkartierung Sachsen (HyK50) für das Projekt ResiBil – Teilgebiet Zittauer Gebirge – Abschlussbericht. G.E.O.S. Ingenieurges-ellschaft mbH, Freiberg/Halsbrücke – unveröffentlicht.
- [1] https://www.resibil.sachsen.de/downloads-4111.html; 19.10.2020; 14:27 Uhr.
- [2] https://www.estudanky.eu/mapa; 13.10.2020; 12:43 Uhr.
- [3] http://www.doku.arcegmo.de/; 13.10.2020; 12:45 Uhr.

## Hydrogeologie česko-saské křídové pánve mezi Krušnými horami a Ještědem

Z. Hrkal, D. Rozman and P. Eckhardt (eds.)

Publikace byla vydána v rámci projektu ResiBil financovaného z Evropského fondu pro regionální rozvoj, z Programu na podporu přeshraniční spolupráce mezi Českou republikou a Svobodným státem Sasko 2014–2020, registrovaného pod číslem 100267011.

Grafická úprava Oleg Man Tisk PBtisk, a. s., Dělostřelecká 344, 261 01 Příbram

1. vydání, 80 stran

ISBN 978-80-87402-88-7

EU projekt: ResiBil – Bilance vodních zdrojů ve východní části česko-saského pohraničí a hodnocení možnosti jejich dlouhodobého užívání

Projekt ResiBil byl financován z Evropského fondu pro regionální rozvoj, z Programu na podporu přeshraniční spolupráce mezi Českou republikou a Svobodným státem Sasko 2014–2020, registrovaný pod číslem 100267011.

**PARTNEŘI PROJEKTU** Česká geologická služba, Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

Projekt byl zaměřen na společnou ochranu podzemních vodních zdrojů v česko-saské příhraniční oblasti na základě využití moderních modelových prostředků. Cílem projektu je provedení bilance a zhodnocení možnosti dlouhodobého užívání zdrojů podzemních vod a udržitelného hospodaření s nimi v závislosti na očekávaných dopadech klimatických změn. Z provedených studií a modelů vyplynulo, že důvodem změn vodního režimu a vodní bilance v krajině jsou jak vlivy klimatické (vyšší průměrné teploty, roky chudé či bohaté na srážky apod.), tak i antropogenní vlivy (odběry podzemních vod).



LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE







Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka veřejná výzkumná instituce