

MILICKÝ, M., BAIER, J., 2023. Využití modelů transientního proudění podzemní vody k hodnocení vývoje zásob podzemní vody v průběhu suchých period v prostoru terciérních a křídových sedimentů jihočeských pánví a pravostranných přítoků Labe. In: TOLASZ, R., POLCAROVÁ, E. (Eds.), 2023. Sborník příspěvků z První konference projektu PERUN (TA ČR, SS02030040). Praha: ČHMÚ, 162–174, ISBN 978-80-7653-063-8.
<https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.21>

Využití modelů transientního proudění podzemní vody k hodnocení vývoje zásob podzemní vody v průběhu suchých period v prostoru terciérních a křídových sedimentů jihočeských pánví a pravostranných přítoků Labe

(Use of groundwater flow models to assess the evolution of groundwater supplies over the dry periods in the Cretaceous sediments)

Martin Milický, PROGEO, s. r. o., progeo@1progeo.cz
Jan Baier, PROGEO, s. r. o., baier@1progeo.cz

Abstrakt: Jednou z náplní projektu PERUN je zpracování a verifikace komplexních modelů proudění podzemních vod pro vybrané oblasti vodohospodářsky významných akumulací podzemních vod a zhodnocení dosavadní a očekávané změny zdrojů povrchových vod a zásob podzemní vody v kontextu změny klimatu a sucha. V realizovaných etapách projektu byly sestaveny modely ustáleného proudění podzemní vody v pěti lokalitách (jihočeských křídových pánvích, v křídě pravostranných přítoků Labe, ve Vysokomýtské a Ústecké synklinále, v terciéru karpatské předhlubně a v křídě dolní Kamenice a Křinice). Na tyto modely navazovaly simulace transientního proudění podzemní vody pro období 1980–2020, při využití vstupů (měsíční dotace podzemní vody) z hydrologického modelu Bilan (zpracované zvlášť pro útvary podzemních vod a hydrogeologické rajóny). Modelové výsledky byly porovnány s měřenými hladinami a vyhodnocenými základními odtoky v simulovaném období. Jedním z cílů realizovaných transientních modelů proudění podzemní vody bylo zhodnocení využití výstupů z hydrologického modelu jako vstupních dat modelu hydraulického. V navazujících etapách projektu budou výsledky hydrologických modelů, vypočtených pro různé klimatické scénáře, využity jako vstupy pro prediktivní simulace proudění podzemní vody. Součástí simulovaného období byly dvě výrazné suché periody v letech 1981–1984, a zejména v letech 2015–2020 (s pokračováním do současnosti). Vliv těchto suchých period na vývoj zásob podzemní vody a jejich modelové hodnocení je prezentováno pro vybraný hydrogeologický rajón.

Klíčová slova: zásoby podzemní vody – změny klimatu – hydrologický model – hydraulický model

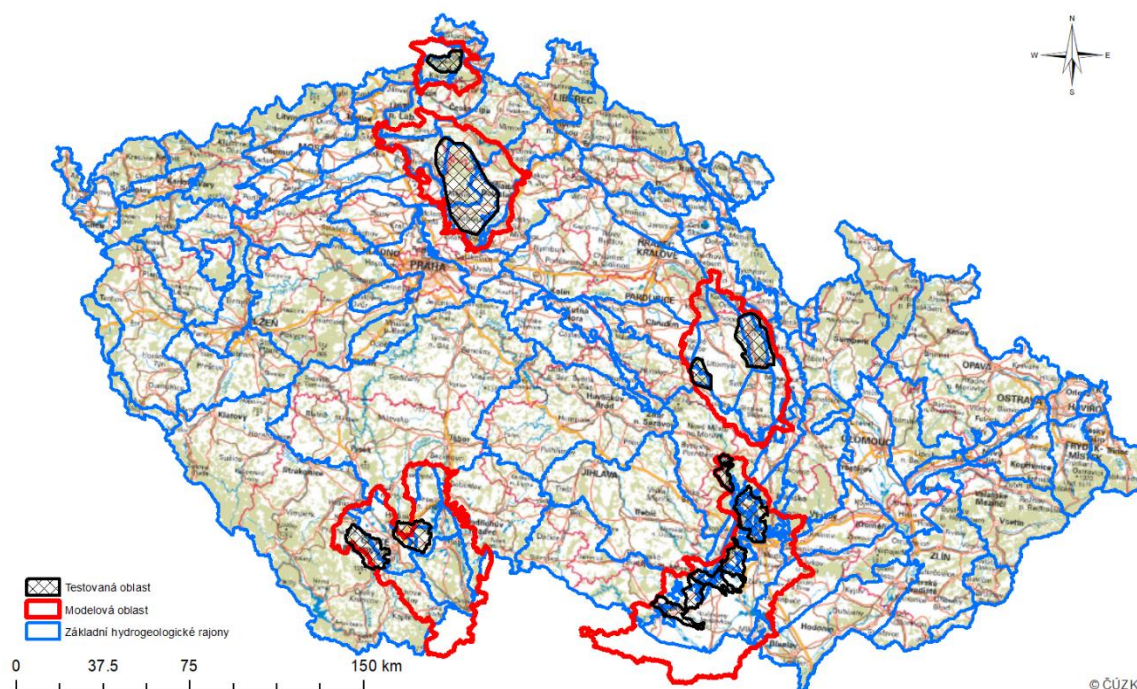
Abstract: The development and verification of comprehensive groundwater flow models for selected areas of water-important groundwater accumulations and the assessment of existing and expected changes in surface water resources and groundwater supplies in the context of climate change and drought are one of the objectives of the PERUN project. In the implemented phases of the project, steady-state groundwater flow models were constructed in five locations (South Bohemian Cretaceous basins, Cretaceous sediments of the right-hand tributaries of the Elbe, Vysokomýtská and Ústecká Syncline, Tertiary of the Carpathian Foothills and Chalk of the Lower Kamenice and Křinice chalk). These models were followed by simulations of transient groundwater flow for the period 1980–2021, using inputs (monthly

groundwater recharge) from the hydrological model Bilan (prepared separately for groundwater units and hydrogeological regions). The model results were compared with measured levels and evaluated baseflows in the simulated period. One of the objectives of the implemented transient groundwater flow models was to evaluate the use of the hydrological model outputs as input data for the hydraulic model. In subsequent stages of the project, the results of the hydrological models, calculated for different climate scenarios, will be used as inputs for predictive groundwater flow simulations. The simulated period included two significant dry periods in 1981–1984, and in particular in 2015–2020 (continuing to the present). The influence of these dry periods on the development of groundwater supplies and their model evaluation is presented for selected hydrogeological region.

Keywords: groundwater supplies – extreme events – hydrological model – hydraulic model

1. Úvod

V projektu PERUN je problematika podzemních vod v souvislosti s vlivem sucha a změnou klimatu hodnocena v pěti oblastech (obr. 1), které byly vybrány pro svůj vodohospodářský význam, ale podmínkou výběru byla i hustota monitorovací sítě ČHMÚ.



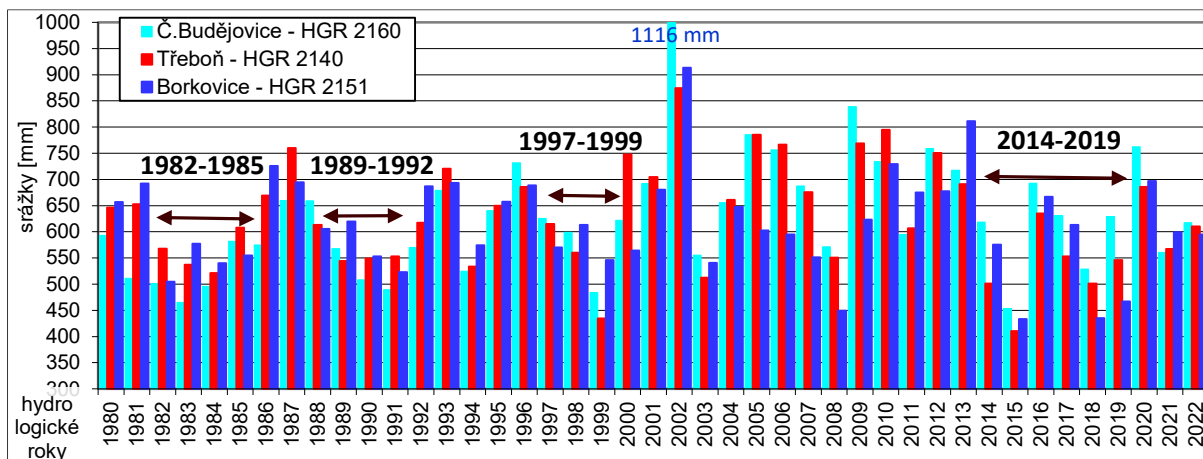
Obr. 1 Situace hodnocených (modelových) oblastí.

Fig. 1 Situation of the modelled areas.

V realizovaných etapách projektu byly sestaveny modely ustáleného proudění podzemní vody, na které navázaly simulace transientního proudění podzemní vody pro období let 1980–2020. Pro modely transientního (neustáleného) proudění byly jako vstupy efektivní infiltrace využity výstupy hydrologického modelu Bilan (ve formě měsíční dotace podzemní vody), zpracované zvlášť pro útvary podzemních vod (ÚPOV) a hydrogeologické rajóny (HGR). Pro tento článek (a prezentaci výsledků) jsme vybrali stručnou dokumentaci zpracování hydraulických modelů a hodnocení ve vodohospodářsky významné oblasti jihočeských pánví. Na rozdíl od standardních bilančních hodnocení zásob podzemní vody, která jsou realizována pravidelně nebo příležitostně ve vybraných hydrogeologických rajónech, jsou hodnocení v rámci projektu PERUN zaměřena i na okrajové nebo mezilehlé oblasti tvorby zdrojů podzemních vod (na oblasti krystalinika mimo HGR).

2. Měření srážky a úrovně hladin podzemních vod

Vývoj hladin a zásob podzemní vody dominantně ovlivňuje časově nerovnoměrný příron vody infiltrované ze srážek (efektivní infiltrace). Velikost efektivní infiltrace významně závisí především na velikosti, časové distribuci a kumulaci srážek v průběhu hydrologických roků. Vývoj srážek v prostoru jihočeských pánví, měřených ve stanicích České Budějovice (394,6 m n. m.), Třeboň-Lužnice (428 m n. m.) a Borkovice (419 m n. m.) je zobrazen na obr. 2, včetně vyznačení kumulací suchých period v tomto období.

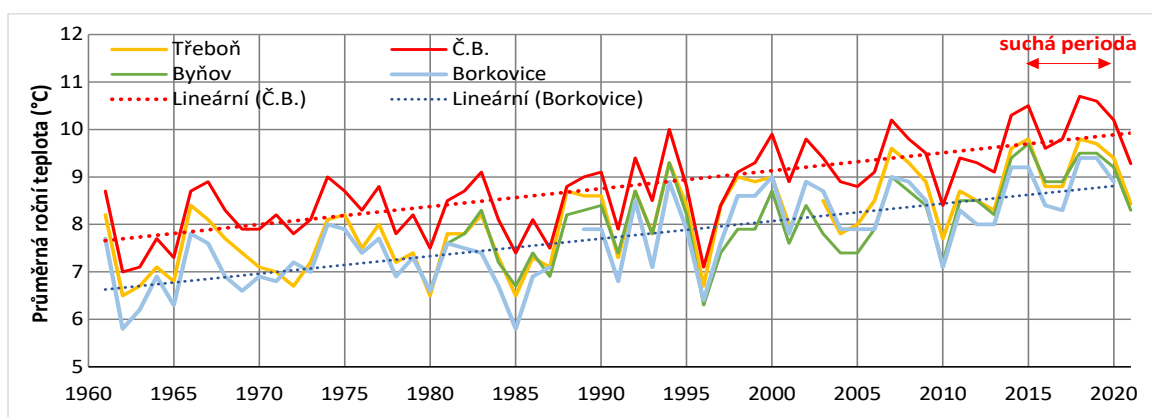


Obr. 2 Měřené srážkové úhrny ve stanicích ČHMÚ situovaných v jihočeských pánvích.

Fig. 2 Measured rainfall in the CHMI stations in South Bohemian basin.

Suché periody se vyskytovaly v obdobích 1982–1985, 1989–1992, 1997–1999 a 2014–2019, extrémně suchý byl i rok 2003. V oblasti jihočeských pánví byla poslední suchá perioda ukončena vlhkým rokem 2020 a i poslední 2 roky jsou srážkově střední. Vlhké periody se vyskytovaly v obdobích 1986–1988, 2000–2002 a 2010–2013, extrémní srážky byly měřeny v roce 2002.

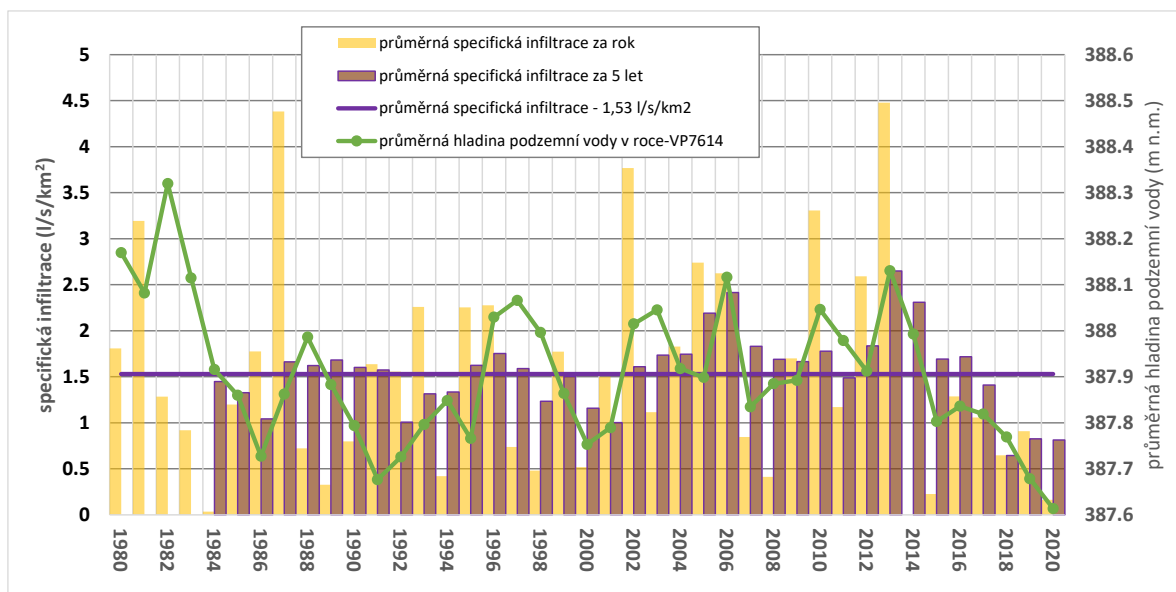
Důležitým faktorem ovlivňujícím srážkovou infiltraci je teplota vzduchu podmiňující výpar z půdy a transpiraci rostlin. Pro zpracování bilance podzemní vody je proto hodnocen i vývoj teplot, který je ze stanic situovaných v jihočeských pánvích dokumentovaný na obr. 3.



Obr. 3 Vývoj průměrných ročních teplot ve stanicích ČHMÚ situovaných v jihočeských pánvích.

Fig. 3 Measured temperature in the CHMI stations in South Bohemian basins.

V rámci řešení projektu (DC 1.4) byly předány hydrologické bilance vypočtené modelem Bilan, které obsahují data o množství infiltrované srážkové vody na hladinu podzemní vody (efektivní infiltrace).



Obr. 4 Vývoj dotace podzemní vody a hladiny podzemní vody v jihočeských pánvích.

Fig. 4 Measured Development of groundwater recharge and groundwater level in South Bohemian basin.

Kumulativní vývoj dotace podzemní vody v pětiletých obdobích spolu s průměrnou roční hladinou ve vrtu VP7614 (Pištín), který je lokalizovaný v infiltrační oblasti budějovické pánve, je dokumentovaný na obr. 4. Průběh průměrné kumulativní dotace dobře odpovídá vývoji hladiny podzemní vody ve vrtu. Nejmenší kumulativní dotace podzemní vody (v pěti po sobě jdoucích letech 2014–2018) byla vypočtena v roce 2018 (ovlivněno zejména rokem 2014, kdy vyšla téměř nulová dotace podzemní vody). Hladina podzemní vody klesala, zejména díky minimálním srážkám v mimovegetačním období, až do roku 2020 (v roce 2021 hladina mírně vzrostla, v roce 2022 spíše stagnovala). Hydrologické bilance jsou použity jako vstupy do modelů transientního proudění (viz kap. 3.1). V obdobích, kdy množství dotace neodpovídá vývoji hladiny (např. roky 2007–2010 v obr. 4), lze předpokládat horší shodu modelových a měřených hladin podzemní vody (kap. 4).

3. Hydraulický model proudění podzemní vody a jeho využití

3.1 Metodika zpracování a hodnocení

Hlavním cílem realizace hydraulických modelů proudění podzemní vody v rámci projektu PERUN je prognózní zhodnocení vlivu sucha na hladiny a zásoby podzemní vody (DC 6.2).

Zpracování modelů proudění podzemní vody bylo zahájeno v DC 1.4. Nejdříve byly zpracovány simulace stacionárního proudění podzemní vody. Výstupem simulací stacionárního proudění podzemní vody jsou průměrné (obvyklé) úrovně hladiny a směry proudění podzemní vody při průměrné (obvyklé) drenáži podzemní vody do říčních toků a průměrné velikosti odběrů s vyčíslením průměrných zásob podzemní vody.

Na zpracované modely stacionárního proudění navázalo sestavení modelů transientního proudění podzemní vody pro období let 1980 až 2020. Základním vstupem pro zpracování transientního proudění je proměnná (v rámci řešení v intervalu 1 měsíce) infiltrace srážek. Infiltrace ze srážek byly odvozeny ze základních odtoků, stanovených hydrologickým modelem Bilan (pro hydrogeologické rajóny (HGR) a pro útvary povrchových vod (ÚPOV)). V aktuální etapě bude doplněno zadání infiltrace stanovené separací pomocí Eckhardtova filtru. Kalibrace modelů transientního proudění byla provázána s výsledky DC 1.3. Při kalibraci byly s modelovými výsledky porovnány různě kolísající měřené hladiny ve vrtech s odlišným výskytem dlouhodobého a sezónního kolísání hladin podzemní vody, s různou rychlostí reakce

na významné dotační epizody (tj. odlišným zpožděním) a různou mírou antropogenního ovlivnění (výsledky DC 1.3 budou i v dalších etapách projektu porovnávány (testovány) s výstupy modelů transientního proudění).

3.2 Model proudění podzemní vody v oblasti jihočeských pánví (JP)

Diskretizace, vstupní data a okrajové podmínky

Modelová oblast byla vymezena tak, aby pokrývala celou plochu základních rajónů – HGR 2140 (Třeboňská pánev–jižní část, TJ) HGR 2152 (Třeboňská pánev–střední část, TSS), HGR 2151 (Třeboňská pánev–severní část, TS) a HGR 2160 (Budějovická pánev, BP), spolu s kompletními povodími toků, které z přilehlých, většinou krystalinických, oblastí směřují do prostoru zájmových základních rajónů (voda z těchto povodí se zčásti uplatňuje ve vodní bilanci oblasti vymezené základními rajóny). Plocha modelu má celkovou rozlohu 2777 km² a horizontálně byla diskretizována do pravidelné čtvercové výpočetní sítě s délkou strany elementu 100 m.

Prostor modelu je ve vertikálním směru diskretizován do pěti vrstev. Vzhledem k limnickému charakteru sedimentární výplně pánví (rychlé a nepravidelné střídání propustných a nepropustných poloh) nelze v JP vymezit obvyklé vertikální horizonty (vrstvy) reprezentující samostatné kolektory a izolátory. První čtyři vrstvy (číslováno odshora) mají plošný rozsah odpovídající celé ploše modelového území. Rozsah 5. vrstvy se zmenšuje v závislosti na úrovni báze sedimentární pánve na její nejhlubší části v oblasti Českých Budějovic a stropnického příkopu.

První modelová vrstva reprezentuje vrstvu kvartérních uloženin a vrstvu zvětralin, pokrývající pánevní sedimenty křídly, terciéru a skalní horniny krystalinika v celé ploše modelového území a také zprostředkovává infiltraci a drenáž vody pro horniny pánevní výplně a krystalinika. Druhou modelovou vrstvu tvoří v ploše pánve křídlové a terciérní sedimenty do hloubky cca 60 m p.t., u kterých z hydrogeologického hlediska převládá funkce kolektoru, v oblastech pánve s menší mocností (TSS) představuje tato vrstva prakticky celou mocnost pánevních sedimentů. Báze třetí modelové vrstvy dosahuje převážně do úrovně 100 m p.t., v oblastech mimo hluboké příkopy v ní probíhá proudění v bazální části pánve a zejména v TS jsou z tohoto horizontu realizované významné odběry podzemní vody. V mělkých částech pánví (TSS) jsou zadané hydraulické parametry odpovídající podložním krystalinickým horninám. Báze čtvrté modelové vrstvy v oblasti zahrnující podloží pánve je zadána rovinou v úrovni 280 m n. m. v TP a 210 m n. m. v BP. Pátá vrstva reprezentuje bazální vrstvu pánevních sedimentů vyskytující v oblastech nejhlubších částí pánví, bází modelové vrstvy je báze pánevních sedimentů. V nejhlubší části pánve proudí podzemní voda v tektonicky založených příkopech v linii toku Vltavy a v povodí Stropnice. Z nejhlubšího horizontu pánve jsou realizovány odběry minerální vody v Byňově (Mattoni 1873 a.s.), v Hrdějovicích a v Českých Budějovicích.

Voda infiltrovaná do přípovrchové vrstvy je částečně drénována do lokálních drenážních bází, částečně se účastní prostorového proudění, při kterém infiltruje do svrchní části pánve dosahující mocnosti do cca 100 m. V JP lze tedy ještě pod mělkou přípovrchovou vrstvou vymezit dva prostorové proudy podzemní vody. Svrchní proud směřují od míst infiltrace k drenážním bázím tvořených významnějšími toky (Stropnice v TP, Blatská stoka v TS nebo Bezdrevský potok v BP). Tento horizont je zejména v TP významně využíván k odběrům podzemní vody.

Proudění podzemní vody v nejhlubším horizontu pánví je dotováno zejména efektivní infiltrací, ke které dochází na výchozech klikovského souvrství na okrajích pánví. Okrajová zlomová pásma drénují horniny krystalinika a podzemní voda po nich přetéká do spodních propustných

poloh. Podzemní voda hlubokého proudění podzemní vody odtéká do oblastí regionálních drenážních bází v údolí Vltavy a Malše v BP a v oblasti Lužnice severně od Třeboně v TP a část podzemní vody je jímána.

Srážková infiltrace je v modelu stacionárního proudění zadána na celou plochu první modelové vrstvy formou dílčích zón s konstantní hodnotou toku – okrajovou podmínkou 2. typu. Velikost infiltrace (v rozsahu $0,7-3,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$) je zadána na základě výsledků projektu Rebalance a na základě map základních odtoků podzemní vody (Krásný 1982). Vyšší hodnota infiltrace byla v procesu kalibrace stacionárního modelu odladěna v krystaliniku v zázemí bilancovaných HGR, nižší infiltrace byla naopak odladěna v prostoru výskytu méně propustných sedimentů v ploše pánve (spraše v TS). Průměrná infiltrace pro celé modelové území dosahuje hodnoty $2,36 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$.

Hladina podzemní vody je v oblasti kvartérních sedimentů a přípovrchové vrstvy rozpojného krystalinika volná. V oblasti mimo výchozy křídových a terciérních sedimentů je hladina podzemní vody napjatá.

Výsledky modelu ustáleného proudění

Hlavními výstupy modelu stacionárního proudění podzemní vody jsou úrovně hladin a směry proudění podzemní vody a bilance podzemní vody.

Izolinie úrovně hladiny podzemní vody a směrů proudění v první modelové vrstvě, reprezentující přípovrchový kolektor zvětralin, eluvia a lokálně vyvinutého kvartéru obsahuje obr. 5. Hladina podzemní vody v první modelové vrstvě je generelně konformní s terénem. Směry proudění ovlivňují lokální drenážní báze, které tvoří i drobné vodoteče. Velké hydraulické gradienty jsou patrné především v jihozápadní části území, kde jsou toky hluboce zařízlé, a úroveň terénu v některých místech přesahuje 1000 m n. m. Podobně je to i v oblasti tzv. lišovského prahu, který odděluje budějovickou a třeboňskou pánev. V centrální části pánve jsou hydraulické gradienty menší a více se uplatňuje drenáž podzemní vody do rozsáhlé sítě vodních toků. Proudění podzemní vody v severní části TP je významně ovlivněno tzv. mažickým zlomem, který zamezuje pokračování proudu podzemní vody ze severu dále na jih a dochází zde k významnému vertikálnímu přetoku podzemní vody do svrchní části pánve a kvartérních sedimentů, který způsobuje vznik rozsáhlých podmačených území (blata, rašeliniště). Mažický zlom zároveň omezuje šíření deprese podzemní vody, způsobené odběry z horusické jímací linie (ČEVAK Dolní Bukovsko, cca $90 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$), lokalizované jižně od mažického zlomu.

Výslednou bilanci podzemní vody, rozdělenou na jednotlivé hydrogeologické rajóny a jejich zázemí, obsahuje tab. 1.

Tab. 1 Bilance modelu stacionárního proudění podzemní vody ($\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$) – jihočeské pánve.

Tab. 1 Groundwater balance of stationary groundwater flow model ($\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$) – South Bohemian basin.

HGR	2140	2152	2151	2160	zázemí	CELKEM
Infiltrace	1227,5	273,1	401,3	861,7	3183,7	5947,4
drenáž do toků	-1287,5	-319,8	-291,9	-749,4	-3006,1	-5654,6
odběry	-79,6	-2,2	-102,5	-98,7	-11,9	-294,9
zázemí a okolní HGR	139,5	48,8	-9,0	-13,7	-165,6	0,0
rozdíl	0,0	0,0	-2,1	0,0	0,0	-2,1

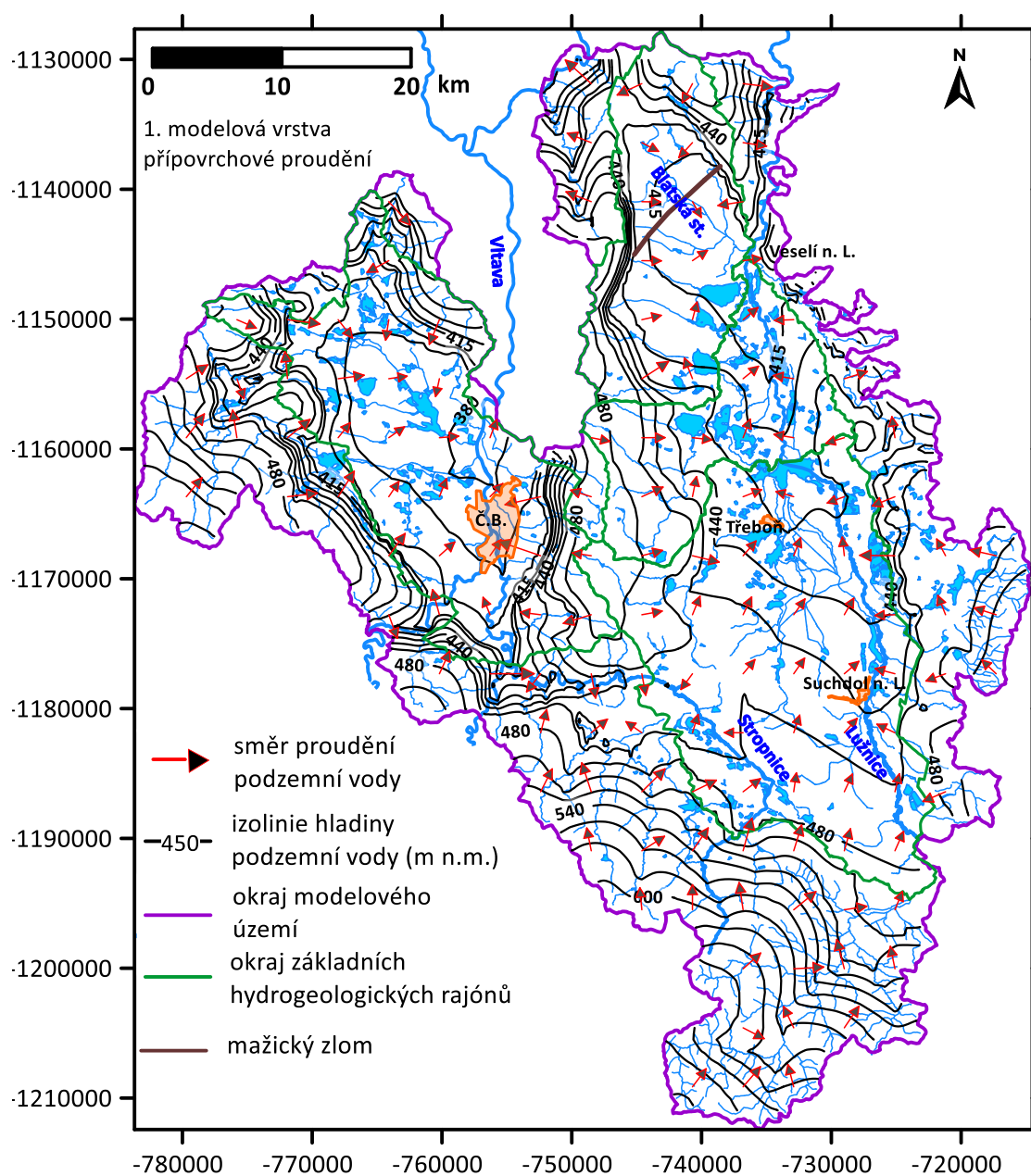
Výsledky modelu transientního proudění podzemní vody

Cílem zpracovaných simulací neustáleného (transientního) proudění podzemní vody je:

- vyhodnocení dlouhodobých a ročních změn doplňování a prázdnění zásob podzemní vody v období let 1980–2020,
- zhodnocení klasifikace měřených vrtů ČHMÚ dle míry shody s rozpoznanými trendy vývoje zásob podzemní vody v modelovaných strukturách, identifikovány jsou objekty vhodné (reprezentativní) pro hodnocení regionálních změn hydrogeologických poměrů lokality, a naopak vrty s „neobvyklým“ vývojem hladiny, reprezentující lokální specifické geologické a hydrogeologické podmínky v okolí daného vrtu,
- identifikace vrtů v oblasti hydraulického ovlivnění realizovanými odběry podzemní vody,
- identifikace period (období) s nedostatečnou shodou modelového a pozorovaného vývoje zásob podzemní vody při zadání infiltrace z výstupů hydrologického modelu BILAN, při porovnání výstupů pro HGR a ÚPOV,
- simulace vývoje proudění, hladin a zásob podzemní vody pro vyhodnocené klimatické scénáře v dalších částech projektu PERUN (s cílem názorně popsat důsledky nepříznivého vývoje).

Kombinace hydrologických modelů a modelů proudění podzemní vody umožňuje vzájemné zpřesňování popisu vývoje zásob podzemních vod. Přednosti hydrologických modelů spočívají především v podrobnějším popisu procesů ovlivňujících (snižujících) průsak srážkové vody na hladinu podzemní vody (intercepce, povrchový odtok, retence vody v půdním horizontu, evapotranspirace). Modely proudění podzemní vody s podstatně větší podrobností popisují proudění a vývoj zásob podzemní vody v saturované zóně (při prostorovém zohlednění geologických a hydrogeologických charakteristik modelové oblasti).

Pro modelové hodnocení vývoje zásob a hladin podzemní vody v čase (transientní proudění) byla použita vstupní data vypočtená modelem hydrologické bilance Bilan, stanovená pro plochy HGR a ÚPOV (relativní změny infiltrace stanovené modelem Bilan byly zadány jako relativní změny velikosti modelové infiltrace stanovené stacionárním modelem). Největším rozdílem mezi HGR a ÚPOV, kromě jejich vlastní definice, je velikost ploch se stanovenou infiltrací, kdy v zájmovém území jsou 4 základní HGR (a přilehlé oblasti krystalinika) a 52 ÚPOV. Vybrané výsledky hydrologického modelu Bilan jsou uvedeny v tab. 2 a na obr. 6 a 7. Počet měsíců s nulovou dotací podzemní vody a počty měsíců s dotací větší, než je průměrná dotace pro simulované 40. leté období, jsou uvedeny v tab. 2. Pro dotaci podzemí vody stanovenou pro HGR vychází výrazně větší množství měsíců s nulovou dotací a menší množství dní s nadprůměrnou dotací podzemní vody. Pro ÚPOV je dotace rozložena do větší části roku. I když vychází více dní s nadprůměrnou dotací pro ÚPOV, tak její násobky nejsou tak výrazné, jako u HGR (tab. 2).

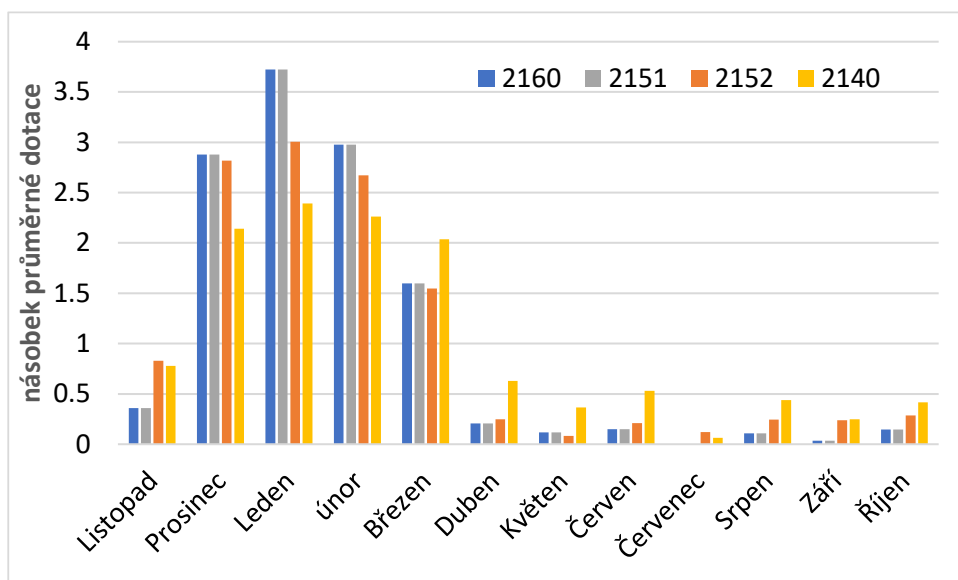


Obr. 5 Úroveň hladiny podzemní vody a směry proudění v první modelové vrstvě – jihočeské pánve.
Fig. 5 Groundwater levels and flow directions in first model layer – South Bohemian basin.

Tab. 2 Porovnání dotace podzemní vody stanovené modelem bilan – pro HGR a ÚPOV.
Tab. 2 Comparison of the groundwater recharge determined by the Bilan model for HGR and ÚPOV.

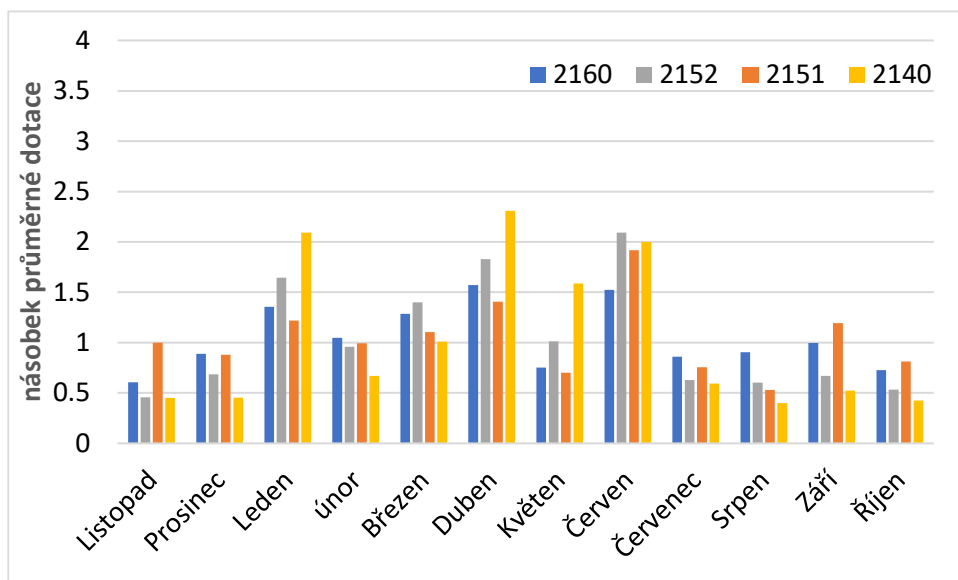
	HGR 2160	HGR 2152	HGR 2151	HGR 2140
počet měsíců s nulovou dotací (HGR)	336	248	336	310
počet měsíců s nulovou dotací (ÚPOV)	85	237	180	2
Počet měsíců s nadprůměrnou dotací (HGR)	107	139	107	133
nadprůměrnou dotací (ÚPOV)	157	143	157	167

Z hlediska doplňování zásob podzemní vody jsou podle modelu Bilan vypočteného pro HGR nejvyšší měsíce prosinec až březen (obr. 6). Průměrné násobky ustálené dotace podzemní vody pro jednotlivé měsíce, stanovené z dotací vypočtených pro ÚPOV (vymezených na území HGR), jsou dokumentovány na obr. 7. Při srovnání vypočtených dotací v jednotlivých měsících nedosahují dotace dle ÚPOV tak velkých hodnot a jsou rozloženy v průběhu celého roku. Vypočtené infiltrace pro jednotlivé ÚPOV pravděpodobně více odrážejí hydrologickou situaci vycházející z odtoku vody na menších tocích, které ovšem nemusí reprezentovat dotaci podzemní vody (s výjimkou mělkých hydrogeologických rajónů, např. TSS).



Obr. 6 Průměrné násobky dotace podzemní vody pro jednotlivé měsíce – HGR.

Fig. 6 Average multipliers of groundwater recharge for individual months – HGR.



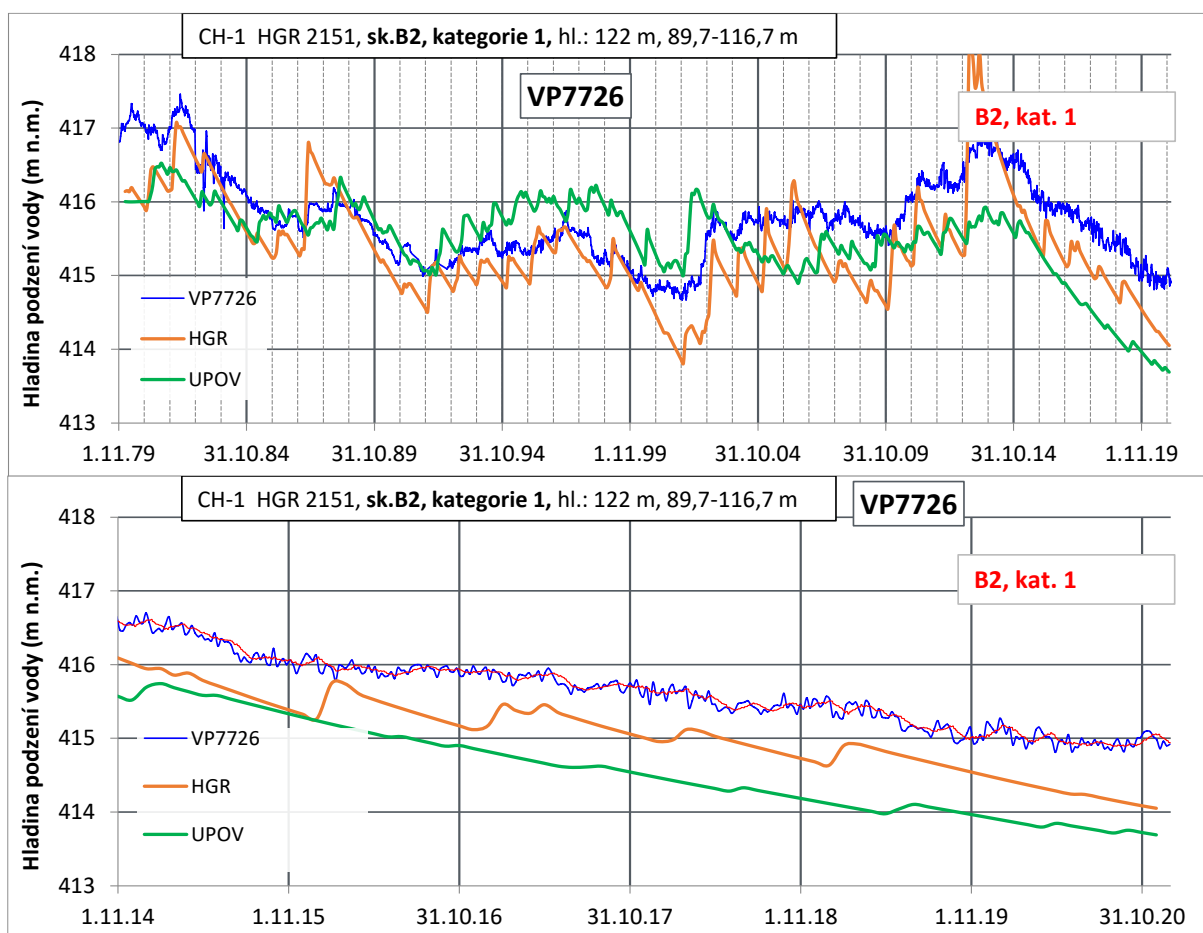
Obr. 7 Průměrné násobky dotace podzemní vody pro jednotlivé měsíce – ÚPOV.

Fig. 7 Average multipliers of groundwater recharge for individual months – ÚPOV.

Odlíšná dotace podzemní vody stanovená pro HGR a ÚPOV má za následek různý průběh modelových hladin podzemní vody, který je pro vrt VP7726 (situovaný v TS) dokumentován na obr. 8. K měřeným datům hladiny ve vrtu (v grafu modře) jsou k dispozici vždy dva ekvivalenty modelového vývoje hladiny podzemní vody (varianta pro HGR (hnědá) a pro ÚPOV (zelená)). Krátkodobé kolísání měřené hladiny podzemní vody v řádech jednotek cm je

způsobeno propagací tlaku vzduchu do volné hladiny ve vrtu. Na monitorovaných hladinách se výrazně méně projevují změny vyvolané pravidelným ročním (jarním) doplňováním a následným prázdněním zásob podzemní vody (dotace stanovené modelem Bilan pro HGR jsou soustředěny zejména do jarních měsíců). Modelové hladiny pro obě zadané dotace podzemní vody vykazují také větší amplitudu kolísání, a to zejména v ročním cyklu. Velikosti poklesu a nárůstu vlivem delších suchých nebo vlhkých period jsou zachyceny dobře.

Modelem transientního proudění podzemní vody jsou stanoveny úrovně hladiny na konci jednotlivých měsíců a lze tak testovat shody vzestupů a poklesů modelových a měřených hladin (bez ohledu na velikost vzestupu/poklesu). Procenta modelových period, ve kterých byl vývoj hladin podzemní vody odlišný (při porovnání na začátku a na konci měsíce), jsou uvedena v tab. 3. Pro vybrané vrtly charakterizované různým zařazením do skupin (DC 1.3) vychází menší chybovost (cca 35 %) pro infiltraci stanovenou pro hydrogeologické rajóny. Pro vrtly zařazené do skupiny A i B vychází shoda měřených a modelových zachycení trendů nárůstu a poklesu hladin obdobně.



Obr. 8 Vývoj měřených a modelových hladin podzemní vody ve vrtu VP7726.

Fig. 8 Development of measured and modelled groundwater levels in the borehole VP7726.

Hodnoty efektivní infiltrace stanovené modelem Bilan pro ÚPOV a HGR, indexem BFI pro HGR a modely transientního a stacionárního proudění podzemní vody jsou shrnuty v tab. 4. Vzhledem k metodice zadávání transientních dotací podzemní vody jsou hodnoty pro modelové infiltrace shodné (stacionární i transientní). Nejmenší dotace jsou stanoveny indexem BFI pro jednotlivé HGR, menší hodnoty mohou být způsobeny ovlivněním základního odtoku odběry podzemní vody. Dotace vypočtené modelem Bilan pro HGR jsou větší než při stanovení pro ÚPOV. Na základě porovnání dotací stanovených při kalibraci modelu proudění

podzemní vody a dotací vypočtenými modelem Bilan nelze přesně určit, které hodnoty vypočtené hydrologickým modelem jsou přesnější (HGRxÚPOV).

Tab. 3 Porovnání úspěšnosti zachycení trendů nárůstu a poklesu hladin v jednotlivých měsících.

Tab. 3 Comparison of the success of capturing the trends of increase and decrease of levels in individual month.

vrt	zatřídění	chybovost (%)	
		HGR	UPOV
VP7726	B2, Kat.1	0.36	0.47
VP0813	A5, kat.1	0.35	0.48
VP7638	B1, kat. 2	0.33	0.44
VP1003	A2, kat. 1	0.33	0.43

Tab. 4 Efektivní infiltrace stanovená modelem Bilan pro ÚPOV a HGR, indexem BFI a modely stacionárního a transientního proudění podzemní vody – porovnání.

Tab. 4 Effective infiltration determined by the Bilan model for ÚPOV and HGR, the BFI index and models of stationary and transient groundwater flow – comparison.

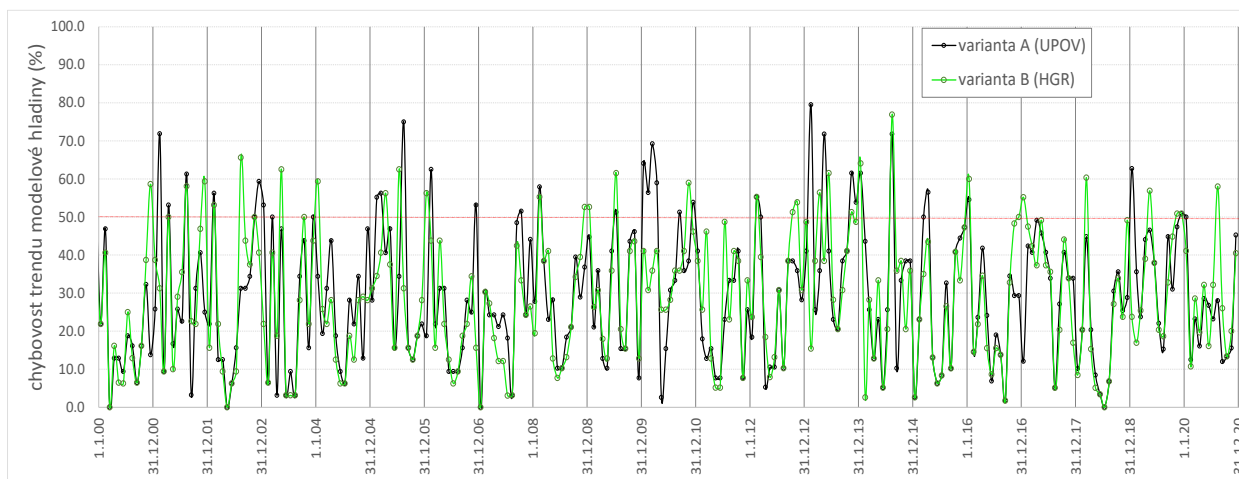
Zdroj výpočtu	období	efektivní infiltrace (l.s ⁻¹ .km ⁻²)			
		2140	2152	2151	2160
Bilan HGR	1961-2021	2.52	2.47	1.53	1.53
Bilan HGR	1981-2020	2.50	2.38	1.53	1.53
Bilan UPOV	1981-2020	2.08	1.99	0.95	1.30
Odtok ČHMÚ - BFI	1981-2020	1.49	1.23	1.03	1.07
Model transient HGR	1981-2020	2.23	1.35	1.54	1.92
Model transient UPOV	1981-2020	2.23	1.36	1.55	1.92
Model stacionár		2.23	1.35	1.54	1.92
	MIN	1.49	1.23	0.95	1.07
	MAX	2.52	2.47	1.55	1.92

4. Porovnání výsledků hydrologického a hydraulického modelu

Určujícím prvkem pro zadání infiltrace do hydraulického modelu proudění podzemní vody jsou výpočty modelu hydrologického. Aktuálně jsou pro každý vrt k dispozici dvě varianty modelového výpočtu úrovně hladiny podzemní vody (HGRxÚPOV). Pokud ani jedna z variant není uspokojivá a modelová hladina se významně odlišuje od pozorovaného vývoje, je jedinou možností další zpřesňování zadání dotace podzemní vody (výpočtů hydrologického modelu). Pro to bude nezbytné, na základě hromadných neshod měřených a modelových hladin podzemní vody, identifikovat výpočetní periody, ve kterých k odlišnému vývoji dochází a výpočetně je upravit. Náročnou alternativou k tomuto postupu je „opuštění“ hydrologického modelu a zadání optimalizované srážkové infiltrace výhradně na základě shody měřených a modelových hladin podzemní vody. Jedním z důvodů nepřesně zadané dotace (infiltrace) může být i vliv desítky metrů mocných, proměnlivě saturovaných zón.

Analýza nepřesností hydrologického modelu ve stanovení infiltrace do horninového prostředí spočívá v průběžné evidenci počtu neshod (vzestupu/poklesu) vývoje měřené a modelové hladiny podzemní vody v každém výpočetním kroku simulace. V případě významného nárůstu počtu vrtů, u nichž je trend vývoje modelové hladiny odlišný od pozorování, je daná výpočetní perioda z hlediska stanovení infiltrace pojata v hydrologickém modelu nepřesně. Chybovost modelových hladin je vykreslena poměrně v procentech (poměr vrtů s chybným trendem

vývoje hladiny/celkový počet porovnávaných vrtů), protože od roku 2000 dochází k nárůstu počtu měřených hladin. Grafické znázornění této analýzy, pro období 1. 1. 2000 – 31. 12. 2020, pro varianty zadání infiltrace pro ÚPOV a HGR obsahuje obr. 9. Průměrná chybovost obou variant modelového výpočtu hladin ve srovnání s pozorováním je za vykreslené období velmi blízká (A: 29,1 %, B: 28,8 %). Chybovost v průběhu jednotlivých let pravidelně kolísá. K největším chybám v modelovém a pozorovaném vývoji hladin dochází především v období doplňování zásob podzemní vody (pozdní podzim, zima a jaro). Naopak v letních měsících s největší evapotranspirací a nejmenší pravděpodobností doplnění zásob podzemní vody, ve kterých dochází k poklesu hladiny podzemní vody ve všech vrtech, chybovost v trendu modelové hladiny podzemní vody obvykle klesá až téměř k nule.



Obr. 9 Porovnání chybovosti modelu postihnout pozorovaný trend vývoje hladiny podzemní vody při zadání infiltrace pro ÚPOV a HGR.

Fig. 9 Comparison of the error rate of the model to affect the observed trend of groundwater level development – input of infiltration according to ÚPOV and HGR.

Vyznačenou mez 50% chybovosti (případně vyšší hodnoty meze 60 %, 70 %) přesahuje modelový vývoj hladin jen v některých letech. Výrazně chybové trendy vývoje modelové hladiny podzemní vody se u obou variant zadání infiltrace vyskytují zejména v letech 2005 a 2012. Z předchozího období se výrazněji chybový vývoj hladin podzemní vody vyskytuje v letech 1991 a 1996.

5. Závěr

Sestavování modelů transientního proudění podzemní vody probíhá ve vazbě na dílčí cíle projektu Perun DC1.3 a DC1.4. Hlavním cílem DC 1.3 je vytvoření nové metodiky, která bude umožňovat hodnocení přírodních zdrojů podzemní vody ze vztahů mezi dotací podzemní vody (stanovené hydrologickým modelem Bilan), základním odtokem odvozeným různými přístupy a režimem podzemní vody v charakteristických vrtech státní pozorovací sítě ČHMÚ.

Transientní modely proudění podzemní vody byly v první polovině projektu PERUN použity pro modelové porovnání vztahu dvou hydrologických přístupů stanovení infiltrace ze srážek (modelem Bilan) a měřených hladin podzemní vody. Modelové simulace proudění podzemní vody ukázaly rozdíly měřených a modelových hladin vypočtených z odlišného zadání vstupní infiltrace. Z modelových výsledků jsou identifikovány jednotlivé měsíce s největší neshodou vývoje hladin podzemní vody, a tím i modelové infiltrace. Tyto informace mohou potenciálně sloužit k rekalibraci výpočtů hydrologického modelu Bilan tak, aby v kritických měsících infiltrace do podzemních vod lépe vyhovovala pro zadání infiltrace ze srážek do modelu proudění podzemní vody.

V další etapě prací budou modely transientního proudění podzemní vody rozvíjeny v návaznosti na každoročně měřená data a nově stanovované základní odtoky a infiltrace. V závěrečné fázi projektu PERUN budou do transientních modelů proudění podzemní vody zadány infiltrace získané z hydrologických modelů na základě klimatických scénářů budoucího vývoje, stanovených v rámci projektu Perun.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.