

Ing. Jan Uhlík, Ph.D.

RNDr. Martin Milický

PROGEO, s.r.o.

Tiché údolí 113, 25263 Roztoky

<https://1progeo.cz/>

Využití modelů proudění podzemní vody pro účely prognózy a zpětného hodnocení zásob podzemní vody – projekt Perun

Úvod

Projektování a provozování zdrojů podzemní i povrchové vody vyžaduje pravidelný přísun informací o změnách množství a jakosti vody. Bilanční hodnocení útvarů podzemních i povrchových vod vychází z řešení rovnice hydrologické bilance, jejímž výsledkem je stanovení podílů srážek, které:

- jsou evapotranspirovány,
- se účastní povrchového odtoku,
- se účastní odtoku podzemního.

Všechny složky odtoku včetně jakosti vody významným způsobem ovlivňuje lidská činnost v rámci managementu krajiny. Namátkou lze jmenovat odlesnění, zemědělskou činnost, výstavbu sídel, průmyslové a dopravní infrastruktury, regulaci toků, nebo meliorace.

Na rozdíl od vlivu na krajinu jsou indicie lidského ovlivnění klimatu pro neodbornou veřejnost obtížně uchopitelné, protože změny probíhají v měřítku délky lidského života a trendy vývoje jsou „ukryty“ v časových řadách za několik desetiletí.

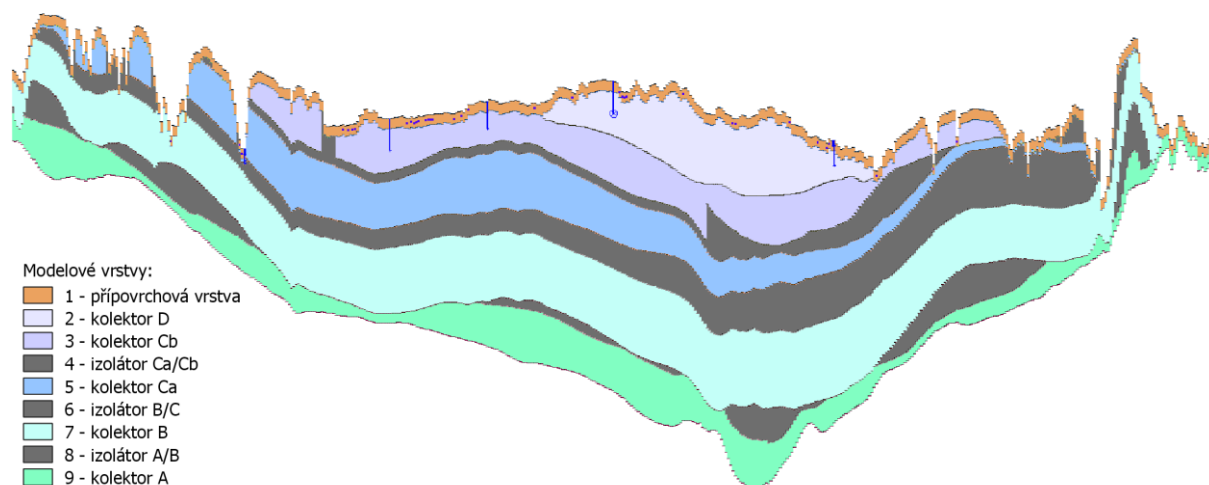
Hydrogeologická hodnocení se neobejdou bez informací o množství, směrech, velikosti a rychlostech proudění podzemní vody. Stanovení těchto údajů vedle terénních prací a měření téměř vždy vyžaduje aplikaci matematických výpočtů. Aplikace modelů proudění podzemní vody se proto stala nedílnou součástí významných úkolů realizovaných v posledním desetiletí (např. [Rebilance zásob podzemních vod](#), [zúžení výběru lokalit hlubinného úložiště radioaktivních odpadů](#), [posuzování vlivu dolu Turów](#) na hydrogeologické poměry na Liberecku, aj.). Rozvoj výpočetní techniky nyní umožňuje modelovat proudění a transport i v komplikovaných

hydrogeologických strukturách. Jedním z přínosů modelů je možnost předpovědi nadcházejících změn hydrogeologických poměrů v důsledku klimatických změn.

Projekt [PERUN](#) se soustředí na hodnocení a předpověď vlivů změn klimatu pro území ČR. Nárůst teplot povede k nárůstu evapotranspirace, Důsledkem bude pokles odtoku povrchového i podzemního – se zřejmými důsledky pro obor vodárenství. Jednou z pěti projektem hodnocených hydrogeologických struktur je oblast východočeské křídly. Toto zájmové území je dosud vedle dalších křídlových struktur, vzhledem k množství zdrojů podzemní vody, považováno za „rezervu“ pro případ úbytku vod v dalších oblastech ČR. Z dosud získaných informací se ale ukazuje, že negativní trendy změn hydrogeologických poměrů se v posledních desetiletích projevují i zde.

Vstupní informace modelového hodnocení

Modelový popis proudění podzemí vody v území východočeské křídly je primárně zaměřen na [hydrogeologické rajony](#) 4270 (Vysokomyšská synklinála), 4231 (Ústecká synklinála v povodí Orlice) a 4232 (Ústecká synklinála v povodí Svitavy). Model ale zahrnuje i části území dalších 10 hydrogeologických rajonů (Obr. 2). Cílem bylo simulovat proudění podzemní vody v celé mocnosti zvodněných křídlových sedimentů. V zájmovém území sedimenty křídlového stáří tvoří komplikovaný systém kolektorů a izolátorů (Obr. 1).



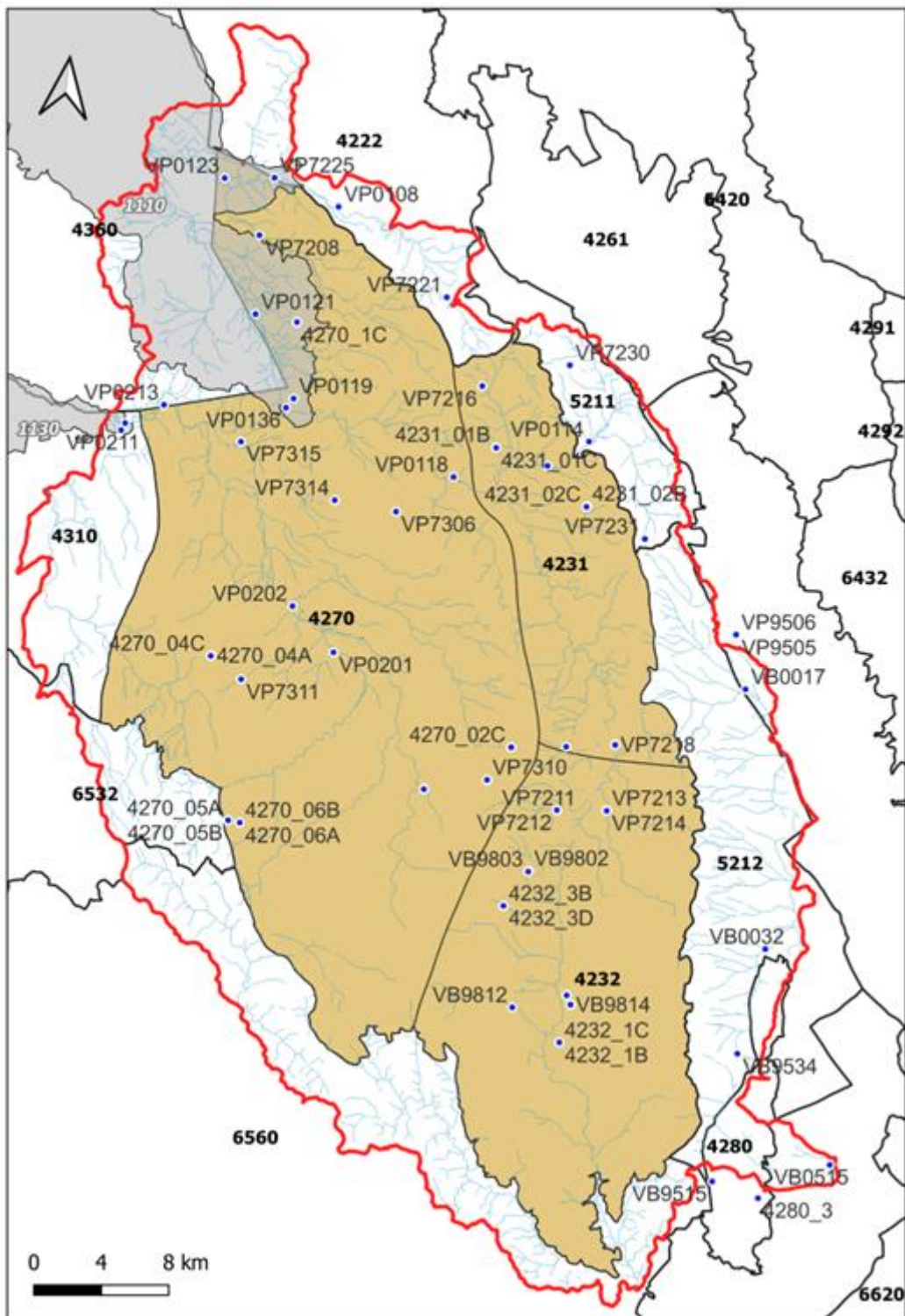
Obr. 1 Vertikální diskretizace modelu – řez modelovou doménou s barevně odlišenými modelovými vrstvami

Ve vertikálním směru je proto horninové prostředí popsáno s využitím 9 modelových vrstev.

Aplikace modelu proudění podzemní vody má dva navazující hlavní cíle:

- zanalyzovat vývoj neustáleného proudění podzemní vody v období leden 1981 – prosinec 2022,
- prognózovat nadcházející vývoj proudění a zásob podzemní vody s ohledem na zpracované scénáře vývoje klimatu.

Pro potřeby analýzy hydrogeologických poměrů a kalibrace modelu byly využity údaje celkem 59 monitorovaných vrtů. Z toho 37 objektů patří do tzv. hlubinné pozorovací sítě a 22 objektů monitoruje sedimenty kvartérního stáří (mělkou zvoďeň).



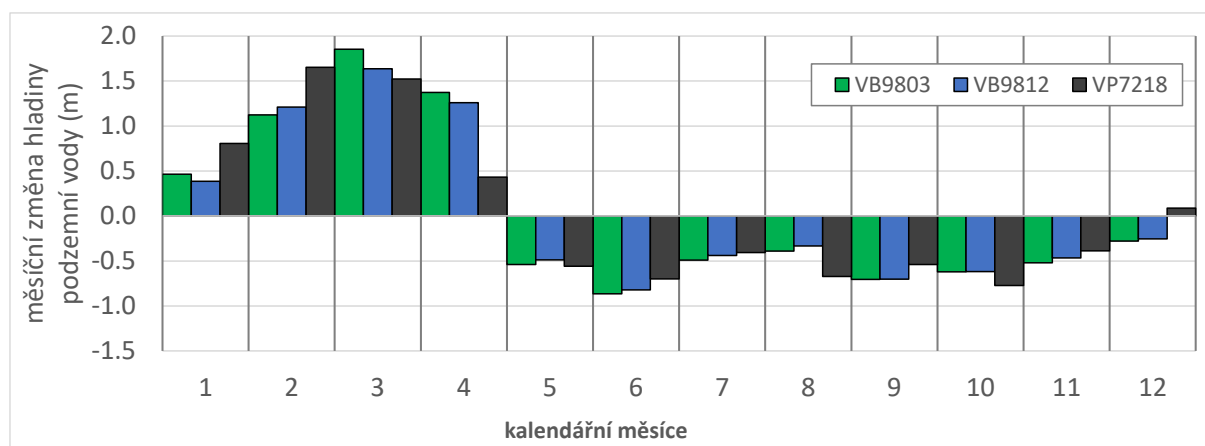
Obr. 2 Modelová oblast s vyznačením hydrogeologických rajonů a polohou vrtů s režimním záznamem úrovní hladin podzemní vody

Analýza vývoje hladin podzemní vody

Byla provedena korelační analýza časových řad hladin podzemní vody. Identifikovány byly vrtý s podobným režimem vývoje hladin i vrtý s anomálním (neběžným) vývojem. Pravděpodobnými příčinami anomálního vývoje jsou obvykle lokální faktory v okolí vrtu (vrt nezastihl regionálně propojený puklinový systém, vrt je situován mimo nádrž podzemní vody, vrt je situován v místě

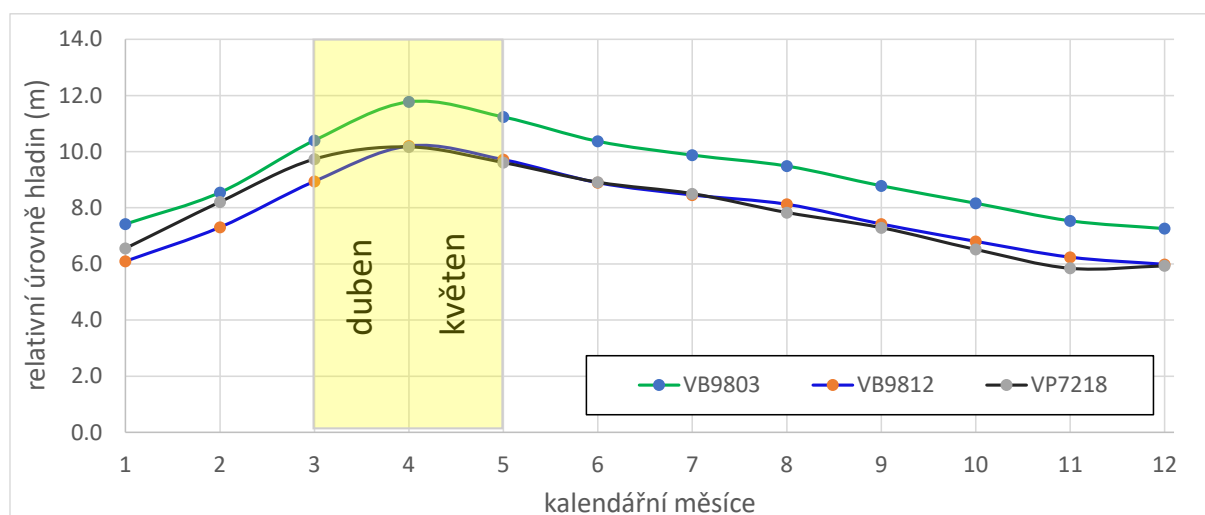
preferenční infiltrace z toku, došlo k havárii výstroje vrtu, vrt je soustavně ovlivňován odběry podzemní vody).

Hladiny podzemní vody v kvartérních sedimentech vlivem kolísání hladin a průtoků v blízkých tocích opakovaně vykazují vzestupy a poklesy během jediného měsíce. U vrtů hlubinné sítě, monitorujících hladiny v kolektorech křídly, jsou trendy změn hladin stabilnější a zvolený měsíční krok hodnocení umožňuje identifikovat měsíce s průběžným doplňováním a prázdněním zásob podzemní vody, i měsíce s nejméně jednoznačným vývojem. Pro analýzu byly vybrány tři reprezentativní křídlové vrtů s nejdelší dostupnou řadou pozorování (Obr. 3).



Obr. 3 Měsíční průměrné změny úrovně hladiny podzemní (období 1992 - 2020)

Únor a březen jsou měsíce s obvykle největšími měsíčními vzestupy hladiny podzemní vody. Vzestup hladiny (a zvětšování zásob) obvykle nastává rovněž v lednu a v dubnu. Prosinec je měsíc s nejmenší průměrnou změnou úrovně hladiny podzemní vody. V ostatním období (květen - listopad) dochází průměrně k poklesu hladin a zásob podzemní vody, tedy k prázdnění hydrogeologické struktury.



Obr. 4 Měsíční průměrné úrovně hladiny podzemní vody, relativní výšky

Z vykreslených průměrných úrovní hladiny podzemní vody na konci měsíce (Obr. 4) je zřejmé, že:

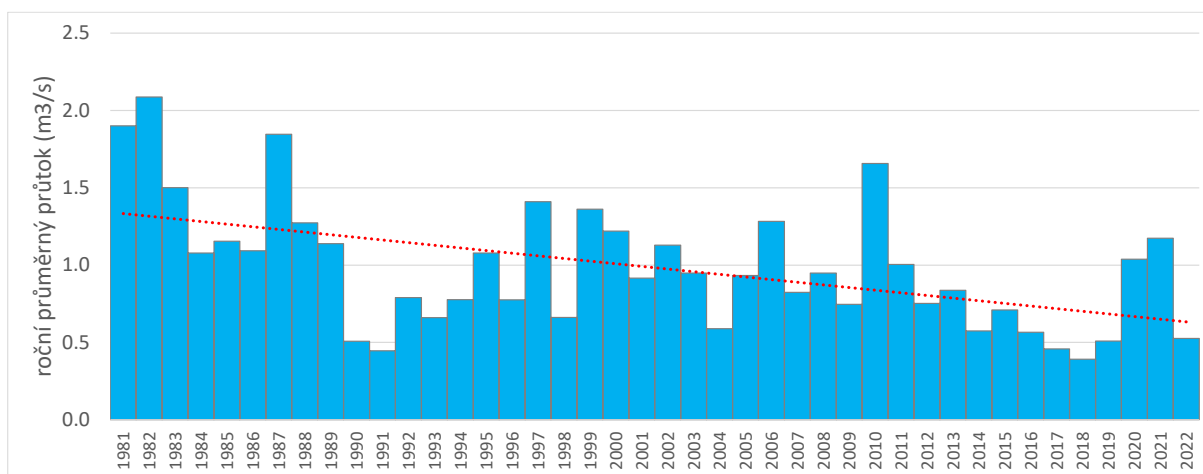
- k růstu hladin obvykle dochází během února až dubna,

průměry teplot. Celkem sedm nejteplejších let z celé časové řady se vyskytlo v období 2014 – 2023 (tedy v posledních deseti letech). Obdobné trendy vývoje teplot lze v posledních desetiletích vyhodnotit pro celé území ČR.

Nárůst teplot prodlužuje vegetační období a zvyšuje evaporaci a transpiraci. Méně vody ze srážek tak zbývá na doplnění zásob podzemní vody a pro následný odtok v říční síti, nebo pro vodní zdroje.

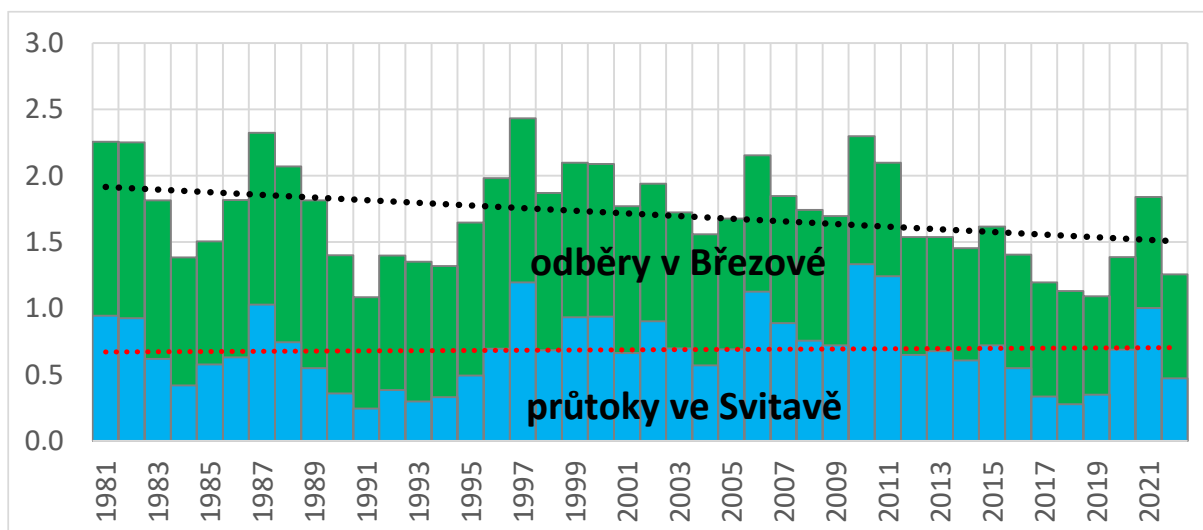
Průtoky v říční síti

Vývoj průtoků v říční síti byl analyzován ve formě ročních průměrů průtoku ve vodoměrných stanicích na Třebovce, Tiché a Divoké Orlici, Loučné a Svitavě. [Datové řady průtoků](#), měřených ČHMÚ, jsou volně dostupné od hydrologického roku 1981. Nejmarkantnější propad průtoků je patrný v povodí Třebovky (Obr. 7).



Obr. 7 Pokles průměrných ročních průtoků Třebovky v hydrologických letech 1981 - 2022, profil Ústí nad Orlicí

Dle lineárního trendu průtoky Třebovky poklesly za 40 let přibližně na polovinu.



Obr. 8 Vývoj bilance odtoku v povodí Svitavy v hydrologických letech 1981 - 2022, profil Rozhraní

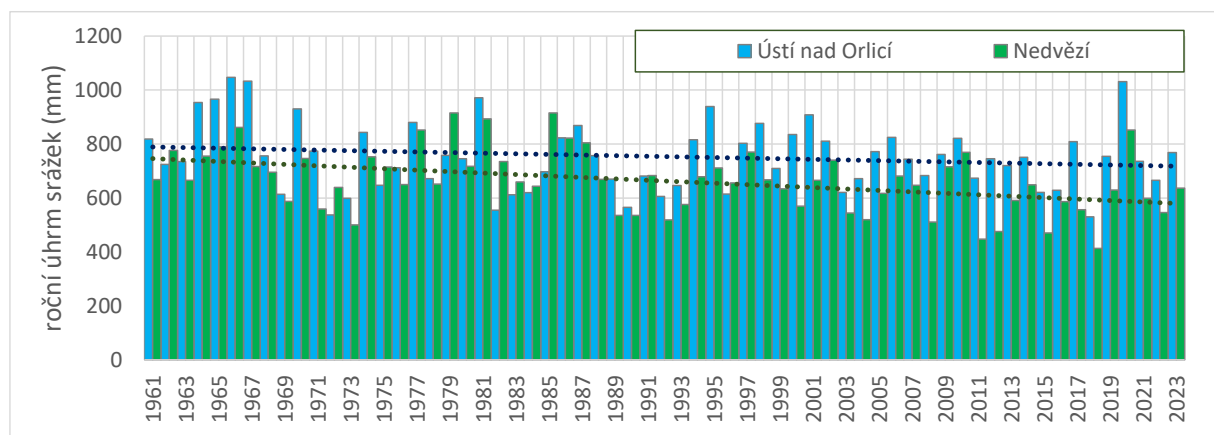
Průtoky ve Svitavě v období 1981 – 2022 zdánlivě neklesají. Ovšem po opravě na významné odběry v oblasti Březové nad Svitavou je patrný trend lineárního poklesu o cca 25 %. Odběry realizované

společností Brněnské vodovody a kanalizace, a.s. se v mezidobí 1995 – 2020 snížily z 1.2 na přibližně 0.8 m³/s.

Pokles odtoku byl s využitím lineárního trendu dále vyhodnocen pro povodí Tiché i Divoké Orlice (profil Dolní Libchavy, pokles přibližně o 35 %; profil Nekoř, pokles přibližně o 25 %). Stejná zkušenost byla v rámci jiných prací získána i pro povodí Moravy (profil Strážnice). Povodí Loučné (profil Zámorsk) je bez trendu poklesu průtoků. V horním povodí (profily Litomyšl a Cerekvice) jsou ale trendy poklesu patrné. Vypouštění odpadních vod (z ČOV Litomyšl a Vysoké Mýto) má na průtoky Loučné stabilizační efekt.

Srážky

Kontinuální řady srážek k posuzované oblasti jsou k dispozici ze stanic Ústí nad Orlicí a Nedvězí.



Obr. 9 Vývoj ročních srážkových úhrnů ve stanicích Ústí nad Orlicí a Nedvězí, kalendářní roky, období 1961 – 2023

V obou stanicích je na více jak šedesátiletých řadách měření patrný poklesový trend. Ve vztahu k vodním zdrojům pokles srážek jednoznačně znamená menší „impulz“ pro doplňování zásob podzemní vody. Při vědomí, že nejvhodnější podmínky pro doplnění zásob podzemní vody se vyskytují v zimních měsících a na začátku jara.

Doplňování zásob podzemí vody

Průsak srážkových vod na hladinu podzemní vody je komplexní proces, který ovlivňuje forma a intenzita srážek samých, poměry v nesaturované zóně (mocnost, typ horninového prostředí, předchozí nasycení), rostlinný kryt, sklonitost a drsnost terénu, dále teplota, vlhkost i proudění vzduchu. Výpočet doplnění zásob podzemní vody z konkrétní srážky je tak značně nejistý.

Proto je bilancování množství podzemní vody obvykle soustředěno na delší časové úseky a větší regiony. Množství podzemní vody lze patřičně měřit až v podobě příionů do říční sítě. Výchozím údajem pro separaci podzemního odtoku z odtoku celkového jsou časové řady průtoků v říční síti. Základními územními jednotkami pro bilancování množství podzemní vody jsou [hydrogeologické rajony](#).

Běžně aplikovaným nástrojem pro výpočet bilance ve zvolených povodích jsou hydrologické bilanční modely. Jejich princip je založen na parametrickém popisu základních procesů hydrologického cyklu. Odladění hodnot parametrů modelu pro konkrétní bilancovanou oblast je primárně založeno na minimalizaci rozdílů modelových a měřených ekvivalentů celkového odtoku. Pro řešení úkolu PERUN je využíván hydrologický model [BILAN](#), vyvinutý ve VÚV TGM, v.v.i.

Simulace proudění podzemní vody

Model proudění podzemní vody pro oblast východočeské křídly byl rozvíjen v krocích odpovídajících standardizovanému postupu zpracování hydrogeologických modelů. V rámci koncepčního modelu byly popsány hlavní charakteristiky hydrogeologické funkce horninového prostředí a byla přijata strategie prací pro sestavení a kalibraci modelu. Analyzována a zpracována byla vstupní data geometrie kolektorů a izolátorů, měřené údaje z monitorovaných vrtů, data o průměrném odtoku podzemní vody, i údaje o parametrech okrajových podmínek (poloha a nadmořské výšky říční sítě, místa a velikost odběrů podzemní vody).

Kalibrace modelu byla provedena na základě dvou simulací popisujících poměry bez vodárenských odběrů a rovněž poměry při dlouhodobých ustálených odběrech. Rozdíl simulací poskytuje podklady pro popis antropogenního ovlivnění hydrogeologických poměrů na modelovém území.

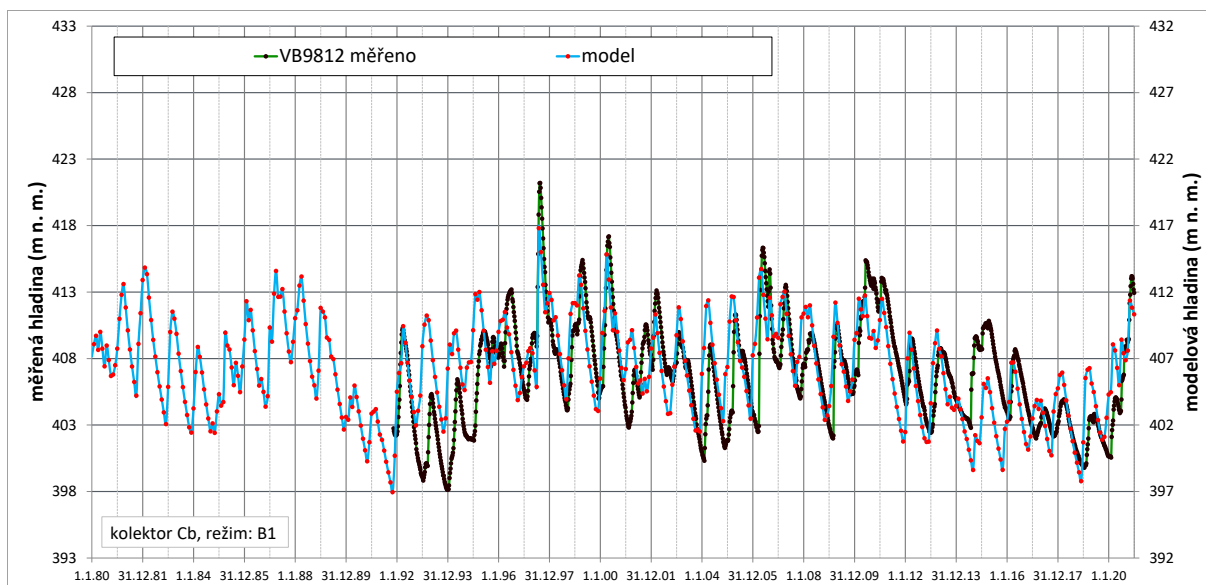
Klíčovým vstupem pro simulace neustáleného proudění podzemní vody jsou údaje o změnách doplňování zásob podzemní vody. V rámci simulací zpětného hodnocení jsou obecně k dispozici dva postupy. Převzít externí informace hydrologického modelu, nebo na základě optimalizace shody pozorovaného a modelového vývoje hladin podzemní vody modelovou infiltrací odvozovat pomocí modelu proudění podzemní vody. V rámci řešeného úkolu PERUN je pro zadání efektivní srážkové infiltrace využíván hydrologický model. Shody a neshody měřeného a modelového vývoje hladiny podzemní vody jsou pak využívány ke zhodnocení efektivity hydrologického modelu při popisu srážkové infiltrace (a tím k optimalizaci hydrologického modelu). To má přínos i pro navazující prognózní simulace vývoje hydrogeologických poměrů zájmové struktury podle vybraných [klimatických scénářů](#).

Dílčí rozdíly modelu proudění podzemní vody a modelu hydrologického ohledně průměrného množství podzemní vody na území jednotlivých hydrogeologických rajonů jsou v simulacích neustáleného proudění eliminovány tím, že časové řady doplňování zásob podzemní vody z hydrologického modelu jsou znormovány a v modelu proudění podzemní vody interpretovány jako násobky hodnoty průměrné infiltrace.

V rámci prognózních simulací bude možné infiltraci do podzemních vod odvodit pouze na základě podkladů hydrologického modelu, který zohlední změny klimatu (teplota a srážky) při výpočtu hydrologické bilance a doplňování zásob podzemní vody. Úvodní analýzy těchto simulací proběhnou v roce 2024.

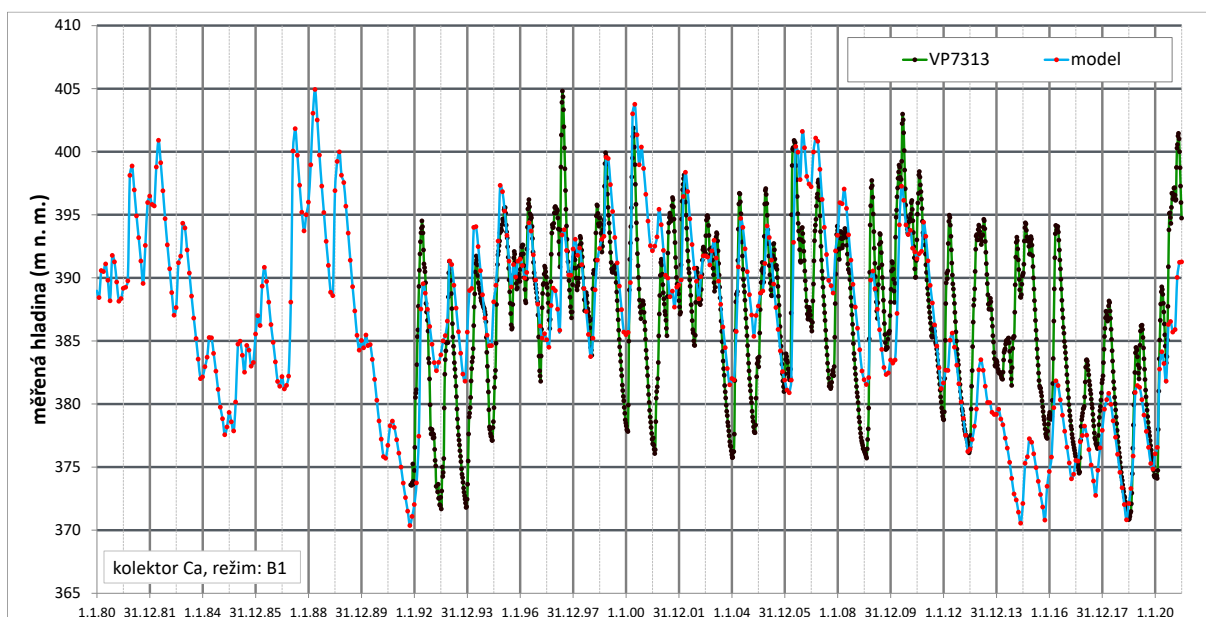
Výsledky

Modelové simulace proudění podzemní vody, založené na infiltraci z hydrologického modelu vhodně postihují pozorované změny hladin v sedimentech křídly (Obr. 10).



Obr. 10 Měřené a modelové hladiny ve vrtu VB9812

Vrt VB9812 je situován v hydrogeologickém rajonu 4232 Ústecká synklinála v povodí Svitavy a vystrojen je pro monitoring kolektoru C_b . Kolektor C_b je v oblasti vrtu dotován srážkovou infiltrací přes proměnlivě saturovanou zónu a má volnou hladinu podzemní vody. Nejvýraznější změny úrovně hladiny podzemní vody v místě vrtu nastávají během ročních cyklů. Patrné jsou ale rovněž víceleté změny hladin (a zásob) podzemní vody, související se střídáním sušších a vlhčích skupin let. Víceleté kolísání úrovně hladiny podzemní vody je způsobeno rovněž tím, že vrt je situován v křídle synklinály mimo oblast soustředěné drenáže podzemní vody. Při úrovni 406 m n. m. je hladina ve vrtu mírně pod úrovní nejbližšího úseku toku Svitavy. Vrt v Radiměři patří k nejreprezentativnějším vrtům modelové oblasti. V matici korelačních koeficientů skupiny 59 měřených objektů má tento vrt jeden z nejvyšších součtů hodnot korelačních koeficientů – vývoj hladin ve vrtu je blízký vývoji hladin ve většině dalších pozorovaných vrtů.

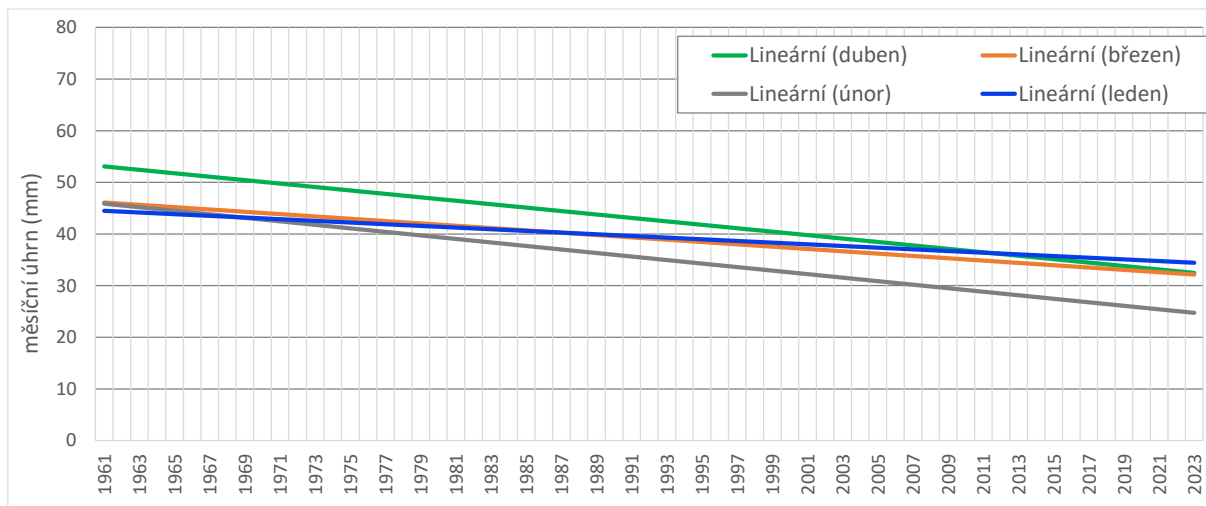


Obr. 11 Měřené a modelové hladiny ve vrtu VP7313

Vrt VP7313 je situován v oblasti hydrogeologického rajonu 4270 (Vysokomytská synklinála) v povodí Loučné a vystrojen je pro monitoring kolektoru C_a. Podzemní voda do kolektoru C_a přetéká z nadložních zvodněných souvrství. V prostoru vrtu dominuje roční cyklus změny úrovně hladiny podzemní vody. Patrné je rovněž víceleté kolísání úrovně hladiny podzemní vody vzhledem k absenci blízké drenážní báze. Hladina podzemní vody v úrovni 390 m n. m. je zakleslá jednotky metrů pod úrovní nejbližšího úseku Loučné. Rovněž vrt VP7313 je řazen k nejvíce reprezentativním vrtům zájmové oblasti.

K nejintenzivnějšímu doplňování zásob podzemní vody dle hydrologických výpočtů modelu BILAN dochází v území rajonu 4232 (povodí Svitavy, 6.0 l/s/km²). Ve dvou dalších hlavních hydrogeologických rajonech (4231 a 4270) vychází z hydrologického výpočtu průměrné doplňování zásob podzemní vody 2.9 a 4.3 l/s/km². Na základě provedených modelových hydraulických výpočtů proudění podzemní vody, kde velikost infiltrace přes hranice hydrogeologických rajonů (ve shodném geologickém prostředí) nemůže vykazovat skokové změny, je údaj 2.9 l/s/km² pro rajon 4231 mírně podhodnocen. V tomto rajonu se na říční síti nevyskytuje vhodný profil pro bilancování celkové odtoku podzemní vody. Profil na Třebovce v Ústí nad Orlicí je proudem podzemní vody v hlubších souvrstvích částečně podtékán a dochází k drenáži až v údolí Tiché Orlice. Kromě toho podzemní voda z horního povodí Třebovky (až po obec Opatov) odtéká do povodí Svitavy (hydrogeologický rajon 4232). Vybilancování hydrogeologického rajonu 4231 je obtížné.

Hlavní charakteristikou neustáleného proudění podzemní vody je proměnlivá dotace zásob podzemní vody ze srážek. Klíčové je zejména období leden – duben. Z analýzy vývoje srážek pro stanici Nedvězí vyplývá, že ve všech čtyřech měsících jsou dle lineárních trendů patrné poklesy srážkových úhrnů. V lednu a březnu mírnější, v únoru a dubnu markantní (Obr. 12).



Obr. 12 Lineární trendy vývoje měsíčních úhrnů srážek v období leden – duben, stanice Nedvězí

V případě stanice Ústí nad Orlicí vykazuje leden v dlouhodobých časových řadách mírný nárůst srážek, únor stagnaci a březen a duben mírný pokles. Trendy vývoje srážek v zájmovém území v období největší dotace zásob podzemních vod zavádají spíše důvody k pesimismu ohledně dalšího vývoje. Vedle poklesu (případně stagnace) srážek dochází vlivem nárůstu teplot rovněž ke zvětšování výparu.

Je proto v souladu s očekáváním, že časové řady ročních úhrnů modelové dotace zásob podzemní vody pro období 1981 – 2022 u všech tří hlavních hydrogeologických rajonů 4231, 4232 a 4270

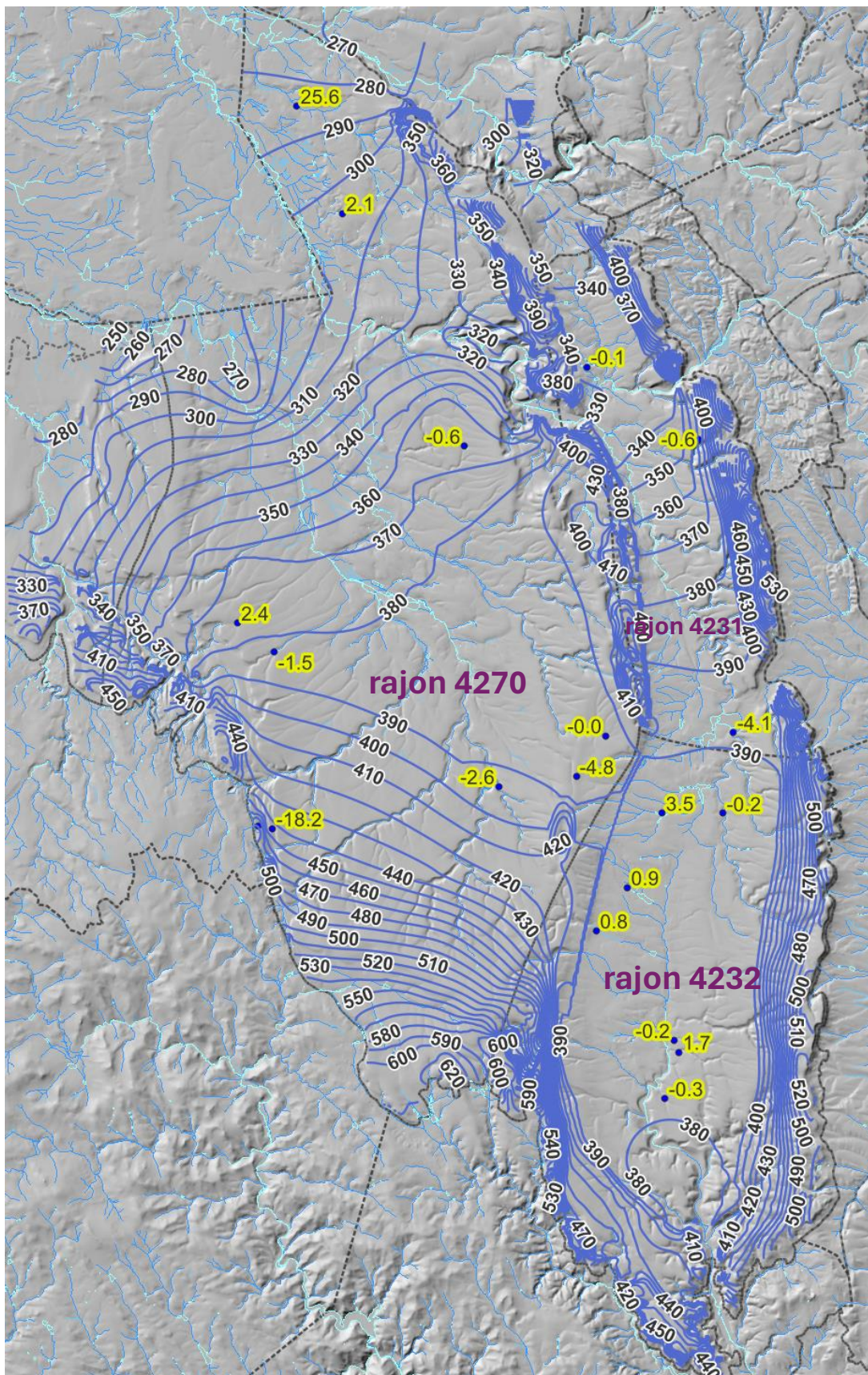
mají klesající lineární trend (20, 17 a 18 % za celé období). Pozvolný pokles dotace zásob podzemní vody znamená pozvolný pokles dostupného množství podzemní vody pro vodní zdroje. Klimatická změna s negativními dopady pro vodní zdroje již probíhá. Nejedná se pouze o procesy ukotvené v „daleké“ budoucnosti.

Klimatické změny reprezentují komplexní proces a jejich charakterizace například s využitím lineárních trendů přináší značnou schematizaci, i možné chyby. Časové řady ročních srážek, teplot i průtoků vykazují cyklické víceleté změny. Záleží proto, zejména při malém počtu cyklů, rovněž na tom, v jaké fázi cyklu analyzované časové řady začínají a končí. Jsou proto doporučovány sofistikovanější metody pro hodnocení výskytu trendu v časových řadách, například Mann-Kendallův test. I jeho použití ale přináší úskalí. Pro časové řady srážek na Obr. 9 test potvrzuje s dostatečnou statistickou významností existenci poklesového trendu pro stanici Nedvězí. Ovšem pro stanici Ústí nad Orlicí je hypotéza o existenci poklesového trendu zamítnuta. To, že vzhledem k časové variabilitě ročních úhrnů srážek v Ústí nad Orlicí nelze na základě stanovených pravidel Mann-Kendalova testu s nastavenou hladinou spolehlivosti mírnější poklesový trend prokázat, ale nutně neznamená, že takový trend reálně neexistuje.

Dlouhodobý pozvolný pokles dotace zásob podzemní vody by se u vrtů v oblasti hydrogeologických rozvodí měl/mohl projevat postupným poklesem dlouhodobějších minim úrovní hladiny podzemní vody. U vrtů v oblastech drenážních bází toto neplatí, protože nejnižší hladina podzemní vody je „zafixována“ hladinou v blízkém toku. Z pozorovací sítě hlubinných vrtů v modelovém území vůbec nejsou dostupná měření před rokem 1991. Pouze u čtrnácti hlubinných vrtů bylo měření zahájeno od roku 1991, nebo 1992. Z toho ale jen 7 vrtů je situováno v oblasti hydrogeologických rozvodí. Po roce 1991 se vyskytla dvě období dlouhodobých minim úrovní hladiny podzemní vody (roky 1992, 1993 a roky 2016 – 2018). V období sucha 2016 – 2018 hladiny podzemní vody v sedmi uvedených vrtech na hydrogeologických rozvodích nepodkročila minima z let 1992 a 1993.

Posuzovaná struktura průběžně reaguje na každoroční vývoj dotace zásob podzemní vody. Malá dotace na začátku roku při obvyklém vývoji znamená významná minima hladin na jeho konci. Dlouhodobá minima hladin a zásob podzemní vody v letech 1992 a 1993 nijak nelimitovala výskyt maximálních hladin a zásob podzemní vody v povodňovém roce 1997 (Obr. 10, Obr. 11). Významně zakleslé hladiny se poté vyskytly již na konci let 1999 a 2000. Měřené hladiny podzemní vody v křídových sedimentech mimo drenážní oblasti každoročně kolísají s amplitudou 5 – 15 m. Posuzovaná struktura má „krátkou paměť“, danou převážně plněním a prázdněním puklinových systémů, a není schopná dlouhodoběji „absorbovat“ změny dotace zásob podzemní vody. U takovéto struktury nelze z porovnání minim hladin v letech 1992 a 2018 automaticky vyvozovat absenci dlouhodobých trendů v doplňování zásob podzemní vody. Vedle změn amplitudy každoročního kolísání hladiny podzemní vody by bylo zajímavé analyzovat i velikost plochy „píků“ hladin daných každoročním doplněním a následným prázdněním struktury.

Podmínky pro pokles zásob podzemní vody jsou (nejen) v posuzované oblasti splněny. Celoročně roste teplota (výpar) a srážky mírně klesají, případně stagnují. Za daných podmínek nelze očekávat, že změny nepostihnou i vodní zdroje. Dosud proběhlé změny naštěstí nepřivodily „kolaps“ vodních zdrojů, „pouze odhalily“ limity silně exploatovaných oblastí. Cílem projektu PERUN je proto nalézt odpovědi, jaký bude další vývoj.



Obr. 13 Modelové izolinie hladiny podzemní vody, kolektor B, odchylky modelové hladiny od měřené

Na Obr. 13 jsou s ekvidistancí 10 m vykresleny modelové izolinie hladiny podzemní vody v bělohorském souvrství (kolektor B). Dobře patrné pro území všech tří hlavních hydrogeologických rajonů východočeské křídly jsou oblasti stoku a oblasti nádrže podzemní vody. Oblasti stoku se vyznačují zvýšenou (až extrémní) hustotou izolinií hladiny podzemní vody a vyskytují se v oblasti os antiklinál. Hladina podzemní vody je v oblastech stoku určována sklonem nepropustné vrstvy bazální partie bělohorského souvrství. V oblastech nádrže podzemní vody je sklon hladiny podzemní vody určen hydraulickou vodivostí kolektoru a intenzitou proudění podzemní vody.

Modré body na Obr. 13 reprezentují místa hydrogeologických vrtů s režimním měřením hladin podzemní vody, pro něž jsou k dispozici ekvivalenty modelových hladin. Žlutě podkreslené údaje reprezentují odchylky modelové hladiny (stacionární simulace) od měřené obvyklé hladiny. Hladina podzemní vody v kolektoru B je mimo oblasti stoku napjatá.

Na území tří posuzovaných hydrogeologických rajonů východočeské křídly tvoří říční síť přítoky Loučné (rajon 4270), Třebovky (4231) a Svitavy (4232). V povodí Loučné se drenážní báze kolektoru B vyskytuje v úrovni cca 270 m n. m., v povodí Třebovky v úrovni 335 m n. m. a v povodí Svitavy cca 380 m n. m. Oblast rajonu 4232 se vyznačuje nejmenším sklonem hladiny podzemní vody v osní části synklinály. Ve Vysokomyštské synklinále v oblasti mezi Litomyšlí a Vysokým Mýtem má napjatá hladina podzemní vody v kolektoru B výtlačnou výšku až 100 metrů nad úroveň terénu. V povodí Třebovky vystupuje artézská hladina maximálně první desítky m nad úroveň terénu. V povodí Svitavy je hladina v kolektoru B, i kvůli odběrům v Březové, zakleslá pod úroveň Svitavy.

Modely proudění podzemní vody

Nejrozšířenějším softwarem pro modelové simulace proudění podzemní vody je program [MODFLOW](#). Program, respektive skupina programů odvozených z tohoto výpočetního kódu, je vyvíjena a volně šířena Geologickou službou Spojených států amerických. Aktuální verzí je výpočetní kód MODFLOW6. Vývoj softwaru MODFLOW byl průběžně podřízován hlavními cílům:

1. vhodně postihnout geometrii modelové domény,
2. vhodně popsat jevy na hranicích modelové domény,
3. umožnit v rámci výpočetního kódu kombinovat regionální a detailní přístup,
4. vhodně popsat nehomogenity horninového prostředí,
5. rozšiřovat schopnosti výpočetního kódu při popisu proudění a transportu,
6. sloučit výpočet proudění a transportu kontaminace do jediného výpočetního kódu.

V rámci klíčových verzí programu (MODFLOW84, 88, 96, 2000, 2005 a MODFLOW6) postupně došlo:

1. ke zpřístupnění možnosti simulovat přetékaní podzemní vody napříč zlomovými strukturami s velkým vertikálním posunem; byla umožněna simulace vyklínění geologických vrstev; bylo zpřístupněno zadání nestrukturovaných výpočetních sítí a numerické řešení s využitím metody konečných diferencí bylo v poslední verzi MODFLOW nahrazeno metodou konečných objemů,
2. k nárůstu možností, jak zadat okrajové podmínky řešených úloh a jejich změn v čase,
3. k možnosti zjemnit výpočetní síť v oblastech určených pro detailní výpočty v horizontálním i vertikálním směru; v poslední verzi MODFLOW koexistují regionální a detailní modely proudění a transportu v rámci jediného výpočtu, přičemž okrajové podmínky pro detailní modely jsou extrahovány z regionálního modelu,

4. v aktuální verzi MODFLOW je umožněno zadat všechny složky tenzoru hydraulické vodivosti i změny jeho orientace oproti souřadným osám, modul proudění umožňuje zavést jednodimenzionální výpočetní prvky pro simulaci studní, drénů, kanálů a toků. Na těchto prvcích je umožněno popsat proudění s užitím rovnic pro tlakové proudění, nebo volný pohyb vody v otevřených korytech,
5. byly doplněny metody výpočtu trajektorií částic unášených prouděním podzemní vody (particle tracking), zlepšovány jsou nástroje pro výpočet bilance modelových podoblastí, zlepšovány jsou možnosti pro zadání kalibračních dat modelu a stanovení jejich modelových ekvivalentů,
6. přímo v rámci MODFLOW kódu je podporován výpočet transportu kontaminace při uplatnění chemických reakcí, různých typů sorpce, rozpadu, molekulární difuze a disperze.

Lze odhadovat, že další vývoj softwaru MODFLOW bude směřovat i k zadání samostatné domény puklin s nedarcyovskou mechanikou proudění a transportu a k simulacím interakcí mezi puklinovou a horninovou (někdy průlinově propustnou) doménou.

Modely mají nezastupitelnou roli při rozhodovacím procesu. Uplatnění jejich výsledků je proto nutně spojeno s otázkami přesnosti jejich předpovědí, protože na nich závisí zvolená technická řešení, finanční prostředky nutné k realizaci těchto řešení i úspěšnost přijatých opatření. Modely založené na numerických simulacích poskytují numericky bezchybné výpočty pro úlohy s nedostatečnými/nejistými a nepřesnými daty.

Klíčem ke správnému využití modelových výsledků je proto primárně sebereflexe modeláře, která má mít za cíl, dostatečně vykomunikovat a zdokumentovat předkládané výsledky modelu – optimálně v bodech:

- volby a způsobu zadání modelu,
- soupisu dat a stavů využitých pro kalibraci modelu,
- dosažené shody modelu s daty získanými pozorováním a hydrogeologickým průzkumem,
- analýzy výsledku modelové prognózy v podobě:
 - informací o přesnosti (mezích) předkládaných modelových výsledků,
 - citlivosti/vlivu modelových parametrů na předkládaný výsledek.
 - informací o přesnosti (mezích) modelových parametrů ovlivňujících modelovou prognózu.

Software MODFLOW byl zejména ve verzi MF2000 programován i ke zpřístupnění utilit, které by umožnily výše uvedený soupis bodů popsat. Aktuální trendy vývoje softwaru MODFLOW ale směřují spíše opačným směrem, kdy řešení nejistot, citlivostí a mezí modelových výsledků i parametrů je předpokládáno v rámci aplikace softwarů třetích stran. Oblíbeným programem v této oblasti je australský software [PEST](#), nebo jeho varieta PEST++, distribuovaná rovněž Geologickou službou Spojených států amerických.

Rozvoj výpočetní techniky a výpočetních kódů umožňuje modelování proudění podzemí vody, založené na fyzikálních zákonech zachování hmoty a proudění podzemní vody v horninovém prostředí zapojit do řešení výzkumných [cílů](#) projektu PERUN. Jako optimální postup se pro simulace neustáleného proudění podzemní vody v podmínkách klimatických změn popsaných variantními scénáři vývoje klimatu jeví propojení modelu proudění podzemní vody a modelu hydrologického.

Závěr

V oblasti posuzovaných hydrogeologických rajonů východočeské křídly dochází k vzestupu teplot, mírnému poklesu srážek i citelnému poklesu průtoků v říční síti. Jedná se o projevy klimatických změn, u nichž lze předpokládat, že v nejbližších desetiletích budou s velkou pravděpodobností [pokračovat](#) – se všemi negativními důsledky pro vodní zdroje. Jako příklad lze uvést bilančně napjatý hydrogeologický rajon 4232 Ústecká synklinála v povodí Svitavy. Přestože po roce 1995 poklesly odběry podzemní vody o 400 l.s^{-1} , v roce 2018 se během periody suchých let vyskytly ve Svitavě (profil Rozhraní; uzávěrový profil hydrogeologického rajonu) minimální průtoky o velikosti 150 l.s^{-1} . Roční průměrný průtok v letech 2017 – 2019 v profilu Rozhraní byl pouze 335, 277 a 349 l.s^{-1} . V místech významné exploatace přírodních zdrojů nebude při pokračování dosavadních trendů vývoje klimatu možné stávající odběry udržet.

Provedené hodnocení dokládá, že již proběhlé změny klimatu mají negativní dopady na množství podzemních i povrchových vod. Základem ochrany je průběžná znalost vývoje poměrů vodních zdrojů. Nástroje pro získání znalosti spočívají v pravidelném monitoringu a hodnocení. Z hlediska množství zásob nelze u zdrojů využívajících podzemní vodu nadále automaticky spoléhat na množství stanovená v rámci hydrogeologických průzkumů předcházejících jejich vzniku. Zpracovaná data dokládají, že za období několika posledních dekád došlo k negativním změnám bilance.

Hydrogeologické poměry hlavních posuzovaných hydrogeologických rajonů (4270, 4231 a 4232) určuje každoroční doplnění zásob podzemní vody, které obvykle nastává v období leden – duben. Ve zbylém období hladiny a zásoby podzemní vody obvykle klesají. Pro doplňování zásob podzemní vody je klíčové období zimy a brzkého jara. Podobnost měřeného vývoje hladin podzemní vody napříč uvedenými rajony dokládá, že z hydrogeologického hlediska se jedná o shodný prostor, který umožňuje aplikovat přijatý modelový popis. Přestože jsou křídové sedimenty i průlinově propustné, významným faktorem, ovlivňujícím propustnost horninového prostředí i velikost kolísání hladin, je výskyt puklinových systémů. O tom svědčí i relativně nízké hodnoty koeficientu volné storrativity, který má pro křídové horniny hodnoty obvykle jen okolo 1 %. Docílená shoda vývoje měřených a modelových hladin a bilance množství podzemní vody pro období let 1981 – 2022 poskytuje záruku, že i prognózní simulace s předpokládaným poklesem doplňování zásob podzemní vody poskytnou relevantní výsledky o změnách úrovní hladin a velikosti zásob podzemní vody.

Význam i využití modelů a jejich výsledků se postupně mění. V moderním pojetí je možné modely proudění podzemní vody chápat jako účelovou databázi (úložiště) hydrogeologických informací o oblasti vodního zdroje, zaměřenou na prostorovou interpretaci tlakových poměrů a bilance proudění podzemní vody (případně její jakosti ve vybraných parametrech chemismu). Tato databáze je průběžně doplňována a zpřesňována na základě nových průzkumů a zpracovaných simulací proudění podzemní vody. Modely jsou nově aplikovány i za účelem posuzování rozsahu nejistot hydrogeologických poměrů, které o zájmovém území přetrvávají, nebo ke stanovení přínosu nových vstupních dat pro připravované projekty.

Obsah

Úvod.....	1
Vstupní informace modelového hodnocení.....	2
Analýza vývoje hladin podzemní vody	3
Trendy vývoje teplot, odtoku a srážek	5
Teploty.....	5
Průtoky v říční síti	6
Srážky.....	7
Doplňování zásob podzemí vody.....	7
Simulace proudění podzemní vody.....	8
Výsledky.....	8
Modely proudění podzemní vody.....	13
Závěr.....	15

Seznam obrázků

Obr. 1 Vertikální diskretizace modelu – řez modelovou doménou s barevně odlišenými modelovými vrstvami.....	2
Obr. 2 Modelová oblast s vyznačením hydrogeologických rajonů a polohou vrtů s režimním záznamem úrovně hladin podzemní vody	3
Obr. 3 Měsíční průměrné změny úrovně hladiny podzemní (období 1992 - 2020).....	4
Obr. 4 Měsíční průměrné úrovně hladiny podzemní vody, relativní výšky	4
Obr. 5 Roční průměrné teploty vzduchu	5
Obr. 6 Měsíční průměrné teploty vzduchu v období 1961 – 2023, stanice Ústí nad Orlicí.....	5
Obr. 7 Pokles průměrných ročních průtoků Třebovky v hydrologických letech 1981 - 2022, profil Ústí nad Orlicí	6
Obr. 8 Vývoj bilance odtoku v povodí Svitavy v hydrologických letech 1981 - 2022, profil Rozhraní	6
Obr. 9 Vývoj ročních srážkových úhrnů ve stanicích Ústí nad Orlicí a Nedvězí, kalendářní roky, období 1961 – 2023	7
Obr. 10 Měření a modelové hladiny ve vrtu VB9812.....	9
Obr. 11 Měření a modelové hladiny ve vrtu VP7313.....	9
Obr. 12 Lineární trendy vývoje měsíčních úhrnů srážek v období leden – duben, stanice Nedvězí	10
Obr. 13 Modelové izolinie hladiny podzemní vody, kolektor B, odchylky modelové hladiny od měřené	12