

Modelová simulace odběrů podzemní vody - podklad pro rozhodování o ochraně a rozvoji vodního zdroje (bilance, doba dotoku k jímacím objektům)

Groundwater flow model – a tool to support decision processes concerning groundwater exploitation

Ing. Jan Uhlík Ph.D., RNDr. Martin Milický,
PROGEO, s.r.o.
Tiché údolí 113
25263 Roztoky u Prahy
tel. 233910935, www.1progeo.cz, progeo@1progeo.cz

Keywords

hydraulický model, kalibrace, okrajové podmínky, bilance podzemní vody
groundwater flow model, calibration, boundary condition, groundwater balance

Abstrakt

V příspěvku je zpracováno téma využití hydraulických modelů pro popis bilance, směrů proudění a úrovně hladiny podzemní vody v oblastech odběrů podzemní vody pro vodárenské účely.

Analyzována je možnost hydraulických modelů zpřesnit údaje o bilanci modelované hydrogeologické struktury. Předložen je přehled způsobů zadání odběrů v hydraulických modelech a doporučen je optimální postup ve vazbě na typ jímacího objektu, rozvoj modelovacího softwaru i výpočetní kapacity počítačů.

Úvod

Cílem příspěvku je poukázat na přínosy, které matematické modelování může poskytnout pro potřeby vodárenské praxe a managementu vodních zdrojů. Jako příklad budou v návazné prezentaci na konferenci použity vybrané výsledky modelového hodnocení proudění podzemní vody, zpracovaného pro centrální oblast hydrogeologického rajonu 1651 - Kvartér Dolnomoravského úvalu.

Vodárenství je obor, v němž se prolínají technické a přírodní vědy. V matematickém modelování jsou uplatněny technické koncepty v oblasti přírodních věd. Modely umožňují rozšiřovat poznání vzhledem k jejich užití jako specifického interpretačního nástroje hydrogeologa. Nejčastějším motivem pro aplikaci modelů je vytvoření prognózy stavu pro dosud nerealizované hydraulické podmínky, případně analýza hydraulických stavů již uplynulých.

Ústřední témata vodárenství

Principiální otázky vodárenství lze formulovat: „Jaké množství vody, v jakém čase a v jaké kvalitě je z předemné struktury možné získat?“ Je téměř pravidlem, že právě přírodní podmínky omezují výsledně vyprojektovanou velikost odběru. Vybudování vodárenské infrastruktury závisí na realistickém odhadu zásob podzemní vody. Dlouhodobý výhled odběrů v nejednom jímacím území navíc aktuálně komplikuje vzrůstající kontaminace, nebo změny klimatu.

Přínos numerických modelů

Numerické modely proudění podzemní vody a transportu kontaminace umožňují analyzovat poměry v hydrogeologických strukturách s volitelným stupněm podrobnosti. V optimálním případě může být model použit pro:

- ověření hydrogeologických úsudků o fungování zájmové struktury,
- zpětné hodnocení, nebo předpověď vlivu odběrů hydrogeologickou strukturou,
- zpracování databáze shrnující dostupné poznání o hydrogeologické struktuře,
- vyhodnocení rizik nepříznivého scénáře (únik kontaminace; snížené doplňování podzemních vod)
- podporu a vymezení dalších průzkumných hydrogeologických prací,
- analýzu nejistot aktuálně dosaženého stavu poznání struktury.

Matematický aparát pro popis proudění podzemní vody v horninovém prostředí byl rozvíjen ve značném předstihu před rozvojem počítačů. Darcyho zákon, metoda proudu, studňová funkce a řada dalších analytických výrazů dokládají význam výpočtů pro popis proudění podzemní vody (ústřední téma hydrogeologie). Výpočty nejčastěji adresují velikost proudícího množství podzemní vody ve vazbě na průběh hladiny a propustnost horninového prostředí.

Rozvoj počítačů umožnil překonat limity spjaté s analytickým řešením parciálních diferenciálních rovnic popisujících proudění a transport. S uplatněním počítačů a specializovaného softwaru (např. MODFLOW) hydrogeologické výpočty zahrnují objem horninového prostředí různého půdorysného tvaru, mocnosti, vertikálního uspořádání zvodní i různé propustnosti. Výpočty (modelové simulace) mohou být realizovány v režimu ustáleného i neustáleného proudění podzemní vody.

Aplikace matematického modelu proudění podzemní vody primárně umožňuje pro celý objem zájmové struktury vypočítat a následně pro potřeby interpretace vykreslit:

- tlakové pole proudění podzemní vody (průběh hladiny podzemní vody),
- směr a velikost proudění podzemní vody (vektory průtoku podzemní vody).

Sekundárně, po zadání transportních parametrů horninového prostředí (pórovitost, disperzivitа, koeficienty vyjadřující sorpci, nebo chemické reakce) lze s využitím transportních modelů vypočítat a vykreslit:

- rychlost proudění, nebo dobu zdržení,
- rozložení koncentrací ve vybraném čase,
- velikost hmotnostního toku rozpuštěných látek.

Uvedené výsledky nalézají široké uplatnění v následujících specifických činnostech hydrogeologa:

- určení lokalit vhodných pro situování nových vrtů (kritériem pro rozšiřování stávajících, nebo pro výběr nových oblastí vodních zdrojů je vypočtená intenzita proudění podzemní vody a snížení hladiny, případně doba zdržení vody v horninovém prostředí),
- stanovení ochranných pásem (interpretace směrů, velikosti a rychlosti proudění podzemní vody v kombinaci s informací o místech potenciálních zdrojů kontaminace jsou klíčové podklady rozhodování hydrogeologa o ochranných pásmech),
- posuzování střetu zájmů (modelová interpretace velikosti snížení hladiny podzemní vody a způsobených změn poměrů proudění podzemní vody jsou důležitými podklady provozovatele vodního zdroje při projednání vznesených námitek ze strany majitelů soukromých pozemků, ochrany přírody, nebo dalších provozovatelů vodních zdrojů),

- stanovení institutu minimální hladiny, případně průtoku (přestože primárním podkladem musí být dlouhodobé detailní pozorování, právě pomocí modelů lze předpovědět k jak velkému omezení vodního zdroje v podmínkách proměnlivých zásob podzemní vody dojde).

Bilance modelového regionu

Vzhledem k rozdílným přírodním poměrům (srážkový normál, časová distribuce srážek, vegetační kryt, sklonitost terénu, propustnost nesaturované zóny i horninového masivu, rozloha) je množství podzemní vody v hydrogeologických strukturách rozdílné.

Bilance je jedním z výstupů hydraulických modelů, protože základem simulace proudění podzemní vody je aplikace bilanční rovnice (zákona zachování hmoty - rovnice kontinuity). Výpočet bilance je zpracován pro celý objem horninového prostředí s výpočtem proudění podzemní vody. Lze ji ale vyčíslit pro libovolně zvolenou podoblast simulované struktury. Navození úplné shody mezi zdroji podzemní vody (především efektivní srážková infiltrace, přítok přes hranice modelu, nebo vce z říční sítě a ze vsakovacích objektů) a odtokem podzemní vody (drenáž do říční sítě, odtok přes hranice modelu, drenáž do pramenů a vodárenských odběrných objektů) je jedním z kritérií numerické správnosti simulace.

Bilanci hydraulického modelu zcela určují zadané okrajové podmínky v kombinaci se zadanou propustností horninového prostředí. Modelová bilance je tak zásadně ovlivněna již při zadání modelu - v rámci specifikace okrajových podmínek. Klíčem ke zpřesnění bilance modelované struktury prostřednictvím hydraulického modelu je možnost kalibrace okrajových podmínek. Nutnou podmínkou pro provedení kalibrace ("vyladění" modelu pro popis známých informací o proudění v simulované struktuře) jsou odpovídající vstupní informace, zejména adresující bilanci podzemní vody - alespoň v části popisované hydrogeologické struktury.

Vhodnou výchozí informací pro zadání hydraulického modelu jsou údaje o dlouhodobém specifickém odtoku podzemní vody. Údaje je možné získat z map podzemního odtoku, nebo na základě analýzy časových řad průtoků v uzlových bodech hydrogeologické struktury.

Podzemní odtok

V období s výskytem srážek je celkový odtok v říční síti dán součtem podzemního, hypodermického a povrchového odtoku. Metodicky je stanovení podzemního odtoku obvykle založeno na separaci (vydělení) odtoku podzemního z odtoku celkového.

Při splnění specifických hydrogeologických podmínek (uzavřenost struktury) dochází nad uzavěrovým profilem říční sítě k úplné drenáži podzemní vody. Separované množství podzemní vody v tomto případě určuje celkové množství podzemní vody proudící ve struktuře (dynamické zásoby podzemní vody). Výsledkem snah o vymezení jednotek se stanovitelným množstvím zásob podzemní vody ve vazbě na geologické, hydrogeologické a hydrologické informace je hydrogeologická rajonizace území ČR.

Separčních metod pro stanovení podzemního odtoku existuje celá řada, průběžně jsou vyvíjeny a rovněž aplikovány metody nové. Stanovení podzemní odtoku se pro jednotlivé metody logicky poněkud liší. Pokud dále uvážíme, že:

- vyhodnocení celkového průtoku v měrných profilech na říční síti vykazuje chyby (vyšší jednotky až první desítky procent),
- hydrogeologické struktury nejsou vždy bilančně uzavřené - dochází k přetokům podzemní vody,
- množství podzemní vody ve struktuře cyklicky kolísá v závislosti na běžném chodu i na anomáliích vývoje klimatu,

je kvalifikovaný odhad množství podzemní vody v hydrogeologické struktuře jednou z nejkompexnějších úloh hydrogeologie. Výsledek je vždy zatížen nejistotou v důsledku vyjmenovaných objektivních příčin, ale i vzhledem k možnosti subjektivního přístupu hydrogeologa (např. volba separační metody).

Bilance s uplatněním hydraulických modelů

Jedním z limitů zmíněných separačních metod pro stanovení podzemního odtoku je podmínka "příznivé konstelace" přírodních poměrů. Struktura musí být dostatečně rozsáhlá, aby generovaný příron podzemní vody způsobil dobře měřitelné rozdíly průtoku v drenážních úsecích toku. Například kvartérní hydrogeologické rajony v povodí větších toků (především Labe, Morava, Vltava, Dyje, ale i v povodích toků vyšších řádů) tuto podmínku nesplňují, protože příron podzemní vody z území hydrogeologických rajonů je zanedbatelný v porovnání s průtokem v drenážním toku.

Nejistota bilance množství podzemní vody obecně vzrůstá s poklesem posuzovaného objemu horninového prostředí, protože daná oblast se vzhledem k anomáliím přírodních podmínek (zejména propustnosti horninového prostředí, ale i infiltrace) může podstatně lišit od průměru pro celý region.

Právě hydraulické modely poskytují možnost výpočtu bilance pro libovolně zvolený objem horninového prostředí. Výpočet závisí na zadané hydraulické vodivosti (modelové interpretaci propustnosti horninového masivu) a na zadaných okrajových podmínkách modelu (infiltrace, vodárenské odběry, drenáž do říční sítě).

Principem hydraulických modelů je vyčíslení Darcyho zákona (při dodržení rovnice kontinuity) mezi všemi elementy (buňkami) vygenerované výpočetní sítě. Výhoda hydraulických modelů oproti běžné aplikaci Darcyho zákona spočívá:

- v kontrole numerické správnosti výpočtu bilance vzhledem k automatickému uplatnění zákona zachování hmoty (vyjádřeného rovnicí kontinuity)
- v možnosti posoudit věrohodnost zadaných údajů modelu pomocí kalibračních mechanismů (výpočet je v souladu s dostupnými znalostmi o průběhu hladiny podzemní vody a známými údaji odběrů a drenáže do říční sítě)
- model lze při existenci kalibračních dat využít pro stanovení pravděpodobného rozsahu průtoku bilancovaným regionem - pomocí variantních simulací proudění podzemní vody (hraniční hodnoty ve výpočtech uvažovaných parametrů modelu jsou stanoveny pomocí zvoleného kritéria neshody modelu a známých hydrogeologických dat o struktuře).

Hydraulické modely umožňují interpretovat velikost hydrogeologického povodí jímacích objektů. Znalost hydrogeologického povodí umožňuje posuzovat intenzitu doplňování zásob podzemní vody v daném území. Rovněž modelová interpretace vlivu odběrů na přirozené podmínky proudění umožňuje zpětně usuzovat na velikost zásob podzemní vody v hydrogeologické struktuře.

V případě modelového posouzení vodních zdrojů by pro kalibraci hydraulického modelu měla být vždy obsažena simulace neovlivněných poměrů proudění (před zahájením odběrů podzemní vody) a simulace s realizovanými maximálními odběry podzemní vody. Tento postup (kalibrace hydraulického modelu pro rozdílnou velikost exploatace struktury) zajišťuje, že hydraulický model plně využije potenciál obsažený v naměřených datech pro zpřesnění (nebo potvrzení uvažované) bilance modelového území.

Simulace odběrů podzemní vody

Z hlediska numerických hydraulických modelů je zadání odběrů realizováno prostřednictvím specifikace okrajových podmínek. Okrajové podmínky definují interakce na hranicích modelové domény (objem horniny určený k modelovému popisu proudění podzemní vody) - v daném případě mezi odběrnými objekty a horninovým prostředím. Odběrné objekty (studny, vrty, zářezy, jímací štoly, pramenní jímky) jsou obvykle situovány na tzv. vnitřní hranici modelu - leží uvnitř modelové domény.

Podle volby typu lze odběry specifikovat pomocí okrajové podmínky:

- bez kontroly odebíraného množství (okrajová podmínka třetího typu a okrajová podmínka prvního typu); k simulaci odběru dochází z toho důvodu, že v okrajové podmínce je specifikována nižší úroveň hladiny, než přirozeně vychází bez existence okrajové podmínky; simulovaná velikost odběru může být částečně nepřímo kontrolována změnami úrovně hladiny v okrajové podmínce,
- s přímou kontrolou odebíraného množství (okrajová podmínka druhého typu přímo specifikuje velikost odběru); při užití této okrajové podmínky modelář ztrácí přímou kontrolu nad úrovní hladiny podzemní vody v místě odběru; nepřímo je vypočtená hladina podzemí vody závislá na zadané propustnosti horninového prostředí v místě odběru.

Okrajová podmínka třetího typu (s využitím zadané úrovně hladiny a odporového koeficientu pro přetok podzemní vody) je obvykle použita pro simulaci jímacích štol, drenážních zářezů a pramenních jímek.

Okrajová podmínka druhého typu (zadáno je odebírané množství podzemní vody) je nejčastěji využita pro simulaci jímacích studní a vrtů.

Všechny tři typy okrajových podmínek mohou být využity i pro simulaci přítoků do modelové domény (zadáním zvýšené úrovně hladiny, nebo změnou znaménka u okrajové podmínky druhého typu).

Běžně aplikované pravidlo modelování sleduje cíl vyhnout se při sestavení hydraulického modelu zadání okrajové podmínky prvního typu. Ta se v kombinaci s nevhodně zadanou propustností horninového prostředí může stát prvkem, který modelovou bilanci posune mimo realistické rozpětí hodnot.

Evidence odběrů, monitorovací síť

Primárním předpokladem jakéhokoliv hydrogeologických hodnocení jsou dostupná data. Absence informací znemožňuje kvalifikované rozhodování o rozvoji vodního zdroje, nebo příčinách nežádoucího vývoje v parametrech množství a kvality jímané podzemní vody.

Odběry podzemní vody jsou v hydraulických modelech zadány při uplatnění následujících informací:

- souřadnice míst jímání podzemní vody,
- průběžná evidence využívaných, odstavených a náhradních vrtů,
- nadmořská výška objektu (jímací štoly, zářezy),
- velikost jímaného množství (časové řady; specifický význam mají dosažená maxima),
- hloubka objektu, geologický profil a vystrojení (především výšky perforace zárubnice).

Zcela nepostradatelnou informací z výše uvedených dat jsou údaje o velikosti odběrů. Zbylé údaje je v některých případech možné doplnit odborným úsudkem, nebo digitalizací (souřadnice). Vhodnou doplňující informací jsou i údaje o hladinách přímo v jímacích vrtech, nebo studnách.

Odpovídající management vodního zdroje předpokládá rovněž evidenci dalších dat, pocházejících převážně z provozování sítě monitoringu kvantity a jakosti podzemní vody. Specifický problém pro simulaci odběrů představují:

- vrty propojující více kolektorů (jímací vrt navozuje ve všech propojených kolektorech prakticky shodnou úroveň hladiny podzemí vody – výsledky simulace by měly tento fakt zohlednit),
- násoskové řady (evidováno je jímané množství podzemí vody za celý násoskový řad – není známo rozložení odběrů na jednotlivé jímací studny; hladina v jímaných studnách roste od krajní k nejvzdálenější jímací studni).

Kombinace rostoucí výpočetní kapacity počítačů a rozvoj numerických metod pro nestrukturované výpočetní sítě postupně umožní místa odběrů podzemní vody v modelu zadat s uvážením přesné geometrie jímacího objektu (např. průměru vrtu). Přínosem pro kalibraci modelu bude i využití úrovní hladin přímo z jímacích objektů.

Závěr

Při dokumentaci výsledků hydraulického modelu by mělo být pravidlem, že je uvedena výsledná bilance proudění podzemní vody v celém modelovém regionu. Dle potřeby i v dalších menších bilancovaných oblastech. Zdokumentován má být rovněž postup, který umožnil bilanci modelu zadat, nebo nakalibrovat.

Hydraulické modely umožňují vypočítat velikost proudění podzemní vody v hydrogeologické struktuře v závislosti na rozložení propustnosti horninového prostředí. Pro simulaci odběrů je v hydraulických modelech (v závislosti na typu jímacího objektu) nejčastěji využívána okrajová podmínka druhého a třetího typu.

Hydraulický model je především svébytný interpretační nástroj - cílem je reprezentovat hydrogeologickou strukturu vždy v souladu s dostupnými informacemi. Je povinností modeláře o tento

Hodnocení s využitím hydraulických modelů je dnes řazeno ke standardním postupům, které přispívají k rozvoji hydrogeologie a vodárenství. Provozovatelé vodních zdrojů mohou optimalizací metodiky sběru a archivace dat z jímacích i monitorovacích objektů zpracování hydraulických modelů usnadnit.