

DU 5

Návrh metodiky modelových řešení na pilotních lokalitách

Ukázka zpracování modelové lokality Káraný

PROGEO s.r.o., 2010



OBSAH :

1.	Úvod	1
2.	Návrh metodiky modelových řešení	2
2.1.	Definování cílů modelu a koncepčního modelu	2
2.1.1.	Definování cílů modelu	2
2.1.2.	Definování koncepčního modelu	3
2.2.	Geometrické vymezení prostoru modelu, okrajové podmínky	4
2.2.1.	Vymezení a diskretizace modelového území	4
2.2.2.	Zadání okrajových podmínek	4
2.3.	Vstupní data	5
2.4.	Realizace a kalibrace modelu proudění podzemní vody	6
2.4.1.	Dokumentace zadání modelu	6
2.4.2.	Realizace výpočtů (simulací) modelu	6
2.4.3.	Kalibrace modelu	7
2.4.4.	Dokumentace kalibrace modelu	7
2.5.	Výstupy (a výsledky) modelu proudění podzemní vody	8
3.	Umělá infiltrace	9
4.	Rešerše a testování softwaru	11
4.1.	Úvod	11
4.2.	MODFLOW	11
4.2.1.	Aplikace programu MODFLOW při řešení hydrogeologických úloh	11
4.2.2.	Matematický popis pohybu podzemní vody v programu MODFLOW	12
4.2.3.	Prostorová diskretizace modelové oblasti a řídicí rovnice proudění	12
4.2.4.	Okrajové podmínky modelu	13
4.3.	FEFLOW	14
4.3.1.	Aplikace programu FEFLOW při řešení hydrogeologických úloh	15
4.3.2.	Vstupní data, okrajové a počáteční podmínky	15
4.3.3.	Výsledky, testování a vizualizace	17
4.4.	Závěr	18
5.	Ukázka modelového řešení na lokalitě Káraný	19
5.1.	Stručný přehled jímání podzemní vody	19
5.2.	Cíle modelování a metodika prací	20
5.3.	Stručný přehled geologických, hydrologických a hydrogeologických poměrů	21
5.4.	Modelové řešení proudění podzemní vody	22
5.4.1.	Diskretizace prostoru, okrajové podmínky a vybraná vstupní data	22
5.4.2.	Realizace, kalibrace a výsledky simulací	23
5.5.	Interpretace výsledků - závěrečné zhodnocení	30
6.	Závěr	31

1. Úvod

Hlavním cílem návrhu metodiky modelových řešení na pilotních lokalitách je detailní popis postupu prací realizovaných v průběhu zadání, kalibrace a při interpretaci výsledků modelových řešení. Metodika je zpracována i při uvážení lokalit s perspektivou využití pro umělou infiltraci. Návrh metodiky je určen pro zpracovatele modelového řešení a pro ostatní subjekty, které budou výsledky modelových simulací využívat pro další posuzování či rozhodování. Návrh metodiky zpracování modelových řešení je obsahem kapitol 2 a 3. V kapitole 3 jsou pojednána některá specifika metodického postupu realizace modelové simulace umělé infiltrace.

Náplní kapitoly 4 je krátká rešerše softwaru využitelného pro modelové řešení proudění podzemní vody.

Obsahem kapitoly 5 je ukázka regionálního modelového řešení na lokalitě Káraný, která slouží jako vzorová lokalita (jediná na území ČR) pro modelové hodnocení lokality s umělou infiltrací. Převážná část navrhované metodiky je totožná s popisem standardního postupu prací pro zpracování „libovolné“ modelové simulace proudění podzemní vody.

Modelové řešení proudění podzemní vody je doporučeno zpracovat na všech potenciálně vhodných lokalitách pro umělou infiltraci, neboť se jedná o komplexní metodu hodnocení zájmového území při provedení syntézy informací a dat z oborů klimatologie, geomorfologie, geologie, hydrologie, hydrauliky, hydrogeologie i dalších oborů.

2. Návrh metodiky modelových řešení

Modelové řešení proudění podzemní vody pro zasakování povrchové vody je v předloženém návrhu metodiky pojímáno jako komplexní materiál, sestávající z těchto na sebe navazujících částí (dílčích kroků):

1. definování cílů modelování, definování koncepčního modelu,
2. geometrické vymezení modelu - stanovení plošného rozsahu, velikosti modelových elementů a počtu modelových vrstev (vertikální i horizontální diskretizace prostoru modelu, volba okrajových podmínek); zadání okrajových podmínek,
3. analýza a zadání vstupních dat modelového řešení (hydraulické charakteristiky horninového prostředí např. hydraulická vodivost, storativita; transportní charakteristiky, disperzivita, objemová hmotnost, sorpční koeficient aj.),
4. kalibrace modelu, tj. nalezení takové sady vstupních parametrů modelu, která zajišťuje nejlepší možnou shodu výstupů numerického modelu a pozorování (hladiny podzemních vod, drenáž (průtoky) do toků apod.),
5. interpretace výsledků modelového řešení včetně zhodnocení nejistot.

2.1. Definování cílů modelu a koncepčního modelu

2.1.1. Definování cílů modelu

Modelové řešení, respektive matematický model proudění podzemní vody v zájmové struktuře je zjednodušenou (numerickou) reprezentací vybraných vlastností a dějů reálného systému. Koncepční (při uvážení všech významných charakteristik modelovaného systému) zpracování modelu má zajistit, že v průběhu jeho realizace budou nalezeny odpovědi na všechny otázky formulované při vytyčení cílů zpracování modelu.

Hlavní cíle modelového řešení v oblastech s umělou infiltrací obvykle jsou:

- simulovat proudění podzemní vody v přírodních (neovlivněných) poměrech a při různých variantách zasakování (a následně i odběrů) podzemní vody. Z rozdílu výsledků simulací neovlivněného stavu a simulací se zasakováním lze stanovit míru hydraulického ovlivnění struktury,
- stanovení bilance množství (zásob) podzemní vody ve vymezeném území (struktuře) – vyčíslení přírodních a indukovaných zdrojů podzemní vody z umělé infiltrace,
- stanovení směrů, rychlostí a dob zdržení proudů podzemní vody od oblastí zasakování k oblastem jímání podzemní vody (v obecném pojetí od míst infiltrace k místům drenáže),
- zhodnocení účinnosti jednotlivých variant zasakování, ve vztahu k navýšení možného odběru podzemí vody a z hlediska posouzení množství úniků infiltrované vody mimo oblasti jímání apod.,
- posouzení vlivu sezónního kolísání srážkové infiltrace, hladin v říční síti a odběrů podzemní vody na vývoj hladin v zájmovém území.

2.1.2. Definování koncepčního modelu

Za koncepční model lze považovat zvolený soubor informací a předpokladů použitých pro zhotovení hydraulického modelu zájmové struktury (shrnutí geologických a hydrogeologických poznatků o zájmovém území). Definice koncepčního modelu vychází ze znalosti prostředí lokality a jejím hlavním cílem je přehledná formulace základní představy o oblasti včetně detailního popisu zasakování, o jejím napájení, drenáži a případně o dalších interakcích s okolím.

Koncepční model by měl vždy obsahovat popis (i schematický):

1. geologické a hydrogeologické stavby území (typ hornin, bází a mocností kolektorů, typ propustnosti, vymezení pozice území umělé infiltrace v rámci většího hydrogeologického celku - kolektoru, hg. rajónu, zvoleného pro zasakování (případně i přítomnost izolátorů v rámci zvolené oblasti),
2. charakteristik zájmového území (zjištěné koeficienty hydraulické vodivosti, vyhodnocené průběhy nenasycené hydraulické vodivosti, volnou a napjatou storativitu; předpokládanou infiltraci do podzemních vod, rovnici hydrologické bilance apod.)
3. oběhu podzemní vody – vymezení oblastí dotace území, drenáže území, směrů proudění podzemní vody,
4. typu umělé infiltrace (typ objektů pro zasakování (vrty, plošné objekty), typ objektů pro čerpání (např. širokoprofilové vrty), předpokládaného vlivu zasakování a odběru podzemní vody na současné poměry proudění podzemní vody),
5. vhodného softwaru (resp. řídicí rovnice popisující fyzikálně-chemické procesy) pro řešení dané problematiky.

Při realizaci modelového řešení proudění podzemní vody rozlišujeme **dvě základní formy simulací**: stacionární a tranzientní.

Stacionární forma simulace je volena v případě dlouhodobě ustálených podmínek systému. Při zasakování vod a následném čerpání podzemních vod jsou touto formou simulace hodnoceny dlouhodobé vlivy umělé infiltrace, případně průměrné ovlivnění poměrů proudění podzemních vod umělou infiltrací. Výstupem stacionární simulace je jediný stav hladin a směrů proudění podzemní vody. Při popisu hydrogeologických systémů s kolísáním srážkové infiltrace je stacionární forma simulace obvykle aproximací průměrných poměrů doplňování, odběrů a drenáže podzemních vod.

Tranzientní forma simulace je volena při výpočtu časových změn úrovní hladin, drenáže do toků a pramenů, nebo infiltrace (např. čerpací zkoušky, vývoj hladin podzemní vody po zahájení zasakování, simulace vývoje hladina a zásob podzemní vody v důsledku proměnlivé srážkové infiltrace a odběrů). Délka časových kroků je závislá na simulovaném jevu (např. denní krok pro čerpací zkoušky, týdenní či měsíční krok pro dlouhodobější situace) a v průběhu simulace se může měnit. Výsledkem tranzientní simulace jsou časové řady stavů úrovně hladin, směrů proudění.

V rámci zpracování „jednoho“ modelového řešení (hodnocení) proudění podzemní vody je vhodné kombinovat obě formy simulací. Při stacionárních simulacích jsou obvykle zkalibrovány hydraulické parametry (koeficienty hydraulické vodivosti). V rámci tranzientních simulací jsou obvykle kalibrovány kapacitní parametry zájmového území (pórovitost, volná a napjatá storativita).

2.2. Geometrické vymezení prostoru modelu, okrajové podmínky

Metodicky lze sestavení modelového řešení proudění podzemní vody rozdělit na tři hlavní oblasti:

1. vymezení a diskretizace modelového území (prostoru modelu),
2. zadání okrajových podmínek,
3. zadání vstupních dat.

2.2.1. Vymezení a diskretizace modelového území

Vymezení prostoru modelu vychází z informací koncepčního modelu a má umožnit řešení cílů podmiňujících zpracování modelu. Optimální postup vymezení prostoru modelu sleduje cíl jednoznačné identifikace okrajové podmínky na hranicích modelu. Optimální je volba okrajů modelu podél nepropustných vrstev, nebo podél linií toků s regionální drenáží podzemních vod. Je výhodné simulovat uzavřené proudové systémy, kdy veškerá podzemní voda je infiltrována i drénována uvnitř modelového území. Snižuje se tak množství nejistot modelu.

Vertikální (počet modelových vrstev) i horizontální diskretizace (rozdělení plochy modelu do výpočetních elementů) prostoru modelu je závislá na složitosti stavby modelované struktury a na vytyčených cílech modelového řešení, spjatých s požadovanou podrobností řešení.

Výpočetní síť, hydraulické charakteristiky a okrajové podmínky umožňují aplikovat aproximativní numerické řešení parciální diferenciální rovnice popisující proudění podzemní vody v simulované struktuře. Hustota výpočetní sítě určuje míru podrobnosti získaných výsledků.

Základem numerických řešení jsou nejčastěji metoda konečných diferencí, nebo metoda konečných elementů.

2.2.2. Zadání okrajových podmínek

V modelovém řešení rozlišujeme tři základní typy (druhy) okrajových podmínek (OP):

- 1. druhu – tzv. konstantní hladina,
- 2. druhu – tzv. konstantní průtok (přítok, odtok, odběr),
- 3. druhu – tzv. kombinované podmínka (zadaná hladinou a odporovým koeficientem).

Okrajová podmínka prvního druhu udržuje ve zvoleném elementu modelové sítě po celou dobu simulace konstantní hladinu podzemní vody. V modelových řešeních nedoporučujeme tuto okrajovou podmínku aplikovat, neboť elementy s konstantní hladinou mají v modelu funkci libovolně velkého zdroje anebo libovolně velkého odběru podzemní vody. Ve všech modelech s okrajovou podmínkou prvního typu by měl být vždy zdokumentován vliv okrajové podmínky na bilanci všech realizovaných variant modelových simulací.

Pomocí okrajové podmínky druhého druhu je ze zvolených elementů modelové sítě simulován přítok/odběr podzemní vody. Klasické využití okrajová podmínka nachází při simulaci srážkové infiltrace, odběrů podzemní vody z vrtů, odtoku, nebo přítoku podzemní vody přes hranice modelu, nebo při simulaci umělé infiltrace. Tato okrajová podmínka na rozdíl od okrajové podmínky prvního typu umožňuje trvalou kontrolu bilance podzemní vody v oblasti modelu při simulacích pozorovaných stavů proudění podzemní vody i při simulacích prognózních. Využití OP při simulaci umělé infiltrace:

- zasakování vody do struktury,
- odběry podzemní vody.

Okrajová podmínka třetího druhu ve zvolených elementech modelu definuje hladinu a odporový koeficient omezující průtok podzemí vody mezi modelem a okrajovou podmínkou. Typickým příkladem užití této okrajové podmínky je simulace drenáže podzemí vody do říční sítě, nebo do pramenního vývěru. Využití OP při simulaci:

- drenážní a infiltrační účinek povrchových toků,
- odběry podzemní vody (drény),
- umělé infiltrace.

2.3. Vstupní data

Vstupní data matematického modelu proudění podzemních vod lze rozdělit do následujících okruhů a je vhodné je získat z následujících podkladů:

- geometrické, geologické a hydrogeologické informace – mocnost, rozloha a omezení kolektorů, izolátorů,
 - topografické mapy - izolinie terénu,
 - geologické mapy, tektonická schémata,
 - dokumentace vrtných prací,
 - hydrogeologické mapy, hydrogeologické řezy,
- hydrologické informace – především informace o celkovém a podzemním odtoku a infiltraci srážek (obvykle založené na rovnici hydrologické bilance, popřípadě na výstupech hydrologického modelu),
 - měsíční a roční srážkové úhrny, srážkové normály,
 - vodohospodářské mapy – výška hladiny vody v toku, podélné profily toku,
 - hodnotící zprávy o velikosti přírodních zdrojů podzemní vody
 - měřené průtoky vody v povrchových tocích, vyhodnocený celkový a základní odtok,
 - výsledky hydrologických modelů,
- hydraulické charakteristiky – odporové a kapacitní parametry charakterizující modelované prostředí (koeficienty hydraulické vodivosti, koeficienty volné/napjaté storativity) včetně jejich prostorové variability,
 - průběhy a vyhodnocení čerpacích a stoupacích zkoušek,
 - průběhy a vyhodnocení stopovacích zkoušek,
 - laboratorní hodnocení pórovitosti,
 - zprávy s hodnocením regionálních čerpacích zkoušek,
- prostorová distribuce (horizontální a vertikální) tlakových poměrů v prostoru modelového území, odvozená na základě měření hladin podzemních vod,
 - měřené úrovně hladin podzemní vody (ustálené, při vrtání) z údajů vrtné databáze Geofondu ČR,
 - časové řady měřených hladin podzemní vody z databází ČHMÚ,
 - karotážní měření ve vrtech,
 - hodnocení piezometrické úrovně hladin jednotlivých kolektorů z regionálních průzkumů.
- prostorová distribuce drenáže podzemních vod do jednotlivých úseků říční sítě.
 - hodnocení expedičních záměrů postupných profilových průtoků na říční síti,

Hydraulické charakteristiky je nutné definovat pro každý element (uzlový bod) výpočetní sítě. Vytvoření odpovídající prostorové interpretace hydraulických charakteristik v modelové síti je předmětem kalibrace modelu. Interpretace bodových měřených informací

hydraulických charakteristik do plochy modelových vrstev je závislá na konkrétním hydrogeologickém uspořádání jednotlivých lokalit *a nelze pro ni popsat jednotný metodický postup.*

Obvyklé metody zpracování a zadání vstupních dat do modelové sítě:

1. interpolace a extrapolace měřených hodnot matematickými metodami (např. gridování); metoda je vhodná pro zadání báze a stropu (povrchu terénu) modelového území.
2. zadání oblastí shodných (stejných) hodnot vstupních modelových dat s měřenou hodnotou vyskytující se v dané oblasti.

2.4. Realizace a kalibrace modelu proudění podzemní vody

Doložení kalibrace modelu a tím i jeho věrohodnosti je nezbytné zahájit přehlednou dokumentací uvažovaných vstupních dat modelu.

2.4.1. Dokumentace zadání modelu

Dokumentace zadání modelu by měla obsahovat:

- údaje o diskretizaci modelu
 - § popis horizontální i vertikální geometrie modelové sítě (plocha území, velikost elementů (případně rozsah jejich velikosti), počet vrstev,
 - § vykreslení geometrie modelové sítě do mapového podkladu,
 - § vykreslení izolinií stropu a báze modelové vrstvy (vrstev) do mapového podkladu s uvedením měřených hodnot (v m n.m.); bodové údaje vrtů zastihujících bázi/strop modelové vrstvy,
 - § tabulka s dokumentací vrtů obsahující X, Y, Z, hloubku a bázi/strop modelové vrstvy,
- vstupní data – klimatická, geomorfologická, geologická, hydrologická, vodohospodářská, hydrogeologická
 - § tabelární a grafické zpracování vstupních hodnot,
 - § identifikaci zdroje dat a popis zpracování vstupních dat (např. z mapových podkladů, z hydrologických hodnocení),
- okrajové podmínky
 - § popis zadaných okrajových podmínek se zdůvodněním jejich aplikace,
 - § vykreslení okrajových podmínek do mapového podkladu (včetně uvedení jejich velikosti).

2.4.2. Realizace výpočtů (simulací) modelu

Stacionární simulace proudění podzemní vody by měly být realizovány pro následující stavy (při zadání průměrných vstupních dat charakterizujících danou situaci):

1. „současné“ proudění podzemní vody bez vlivu umělé infiltrace,
2. vybraný archivní stav (např. při realizaci hg. prací v zájmovém území) – *pro kalibraci modelu,*
3. prognózní stav průměrného a maximálního využití umělé infiltrace v zájmovém území.

Tranzientní simulace proudění podzemní vody by měla být provedena pro:

1. vyhodnocené čerpací a stopovací zkoušky v denním intervalu změn zadávání okrajových podmínek (především zasakování a odběrů podzemní vody),
2. zahájení provozu umělé infiltrace v týdenním resp. měsíčním intervalu změn zadávání okrajových podmínek s cílem postihnou významné změny v hg. poměrech po zahájení provozu.

2.4.3. Kalibrace modelu

Cílem kalibrace je odladění parametrů modelového řešení tak, aby simulovaný proces proudění podzemní vody v co nejvyšší možné míře odpovídal výsledkům měření. Kalibrace modelu je realizována úpravami vstupních dat modelu. *Kalibraci modelu lze považovat za nejnáročnější část realizace modelového řešení proudění podzemní vody.*

Pro kalibraci modelu proudění slouží především tzv. hladinové a objemové kritérium. V rámci hladinového kritéria je hodnocena shoda hladin měřených a hladin modelových. V rámci objemového kritéria je hodnocena shoda obíhajícího množství podzemní vody v modelu a množství vody obíhající v simulované hydrogeologické struktuře prostřednictvím porovnání modelové a vyhodnocené drenáže podzemních vod v jednotlivých úsecích říční sítě.

Model proudění podzemní vody by měl být kalibrován pro více, pokud možno odlišných, variant proudění. Pro kalibraci kapacitních parametrů prostředí je nezbytná tranzientní forma kalibrace na realizované přítokové či zasakovací zkoušky.

Kalibraci (úpravám) podléhá ze vstupních dat nejvíce koeficient hydraulické vodivosti (a případně storativity při tranzientní simulaci proudění). Kalibraci provádíme do té doby, než je dosaženo „optimální resp. dobré“ shody pozorovaných a modelových veličin (hladin podzemní vody, nebo drenáže do toků).

Kalibrována (upravována) mohou být však i další vstupní data modelu

Metodicky nelze stanovit jednotnou míru „optimální“ kalibrace v měrných jednotkách (m, l/s), vždy záleží na charakteru měřených dat použitých pro porovnání (např. časová souslednost měřených hladin), míře schematizace modelové simulace (např. velikost elementů). Zásadním kritériem zhodnocení míry kalibrace má být porovnání všech dostupných informací o lokalitě a příslušných modelových ekvivalentů (směrů proudění, dob zdržení atp.)

2.4.4. Dokumentace kalibrace modelu

Dokumentace kalibrace modelu bude obsahovat:

- porovnání měřených a modelových hladin podzemní vody (hladinové kritérium):
 - § tabulky měřených a modelových hladin včetně uvedení rozdílu mezi měřenou a modelovou hladinou,
 - § grafické porovnání měřených a modelových hladin ($H_{\text{měř.}} - H_{\text{model}}$) a grafické porovnání měřených hladin a modelových rozdílů hladin s vykreslením přímek optimální shody (pomocí paralelních přímek s přímkou optimální shody je vhodné vykreslit „interval optimální shody“, v němž rozdíl modelové hladiny nepřevyšuje zvolenou mezní hodnotu),
 - § při transientní simulaci – graf měřených a modelových hladin ve vybraných objektech v závislosti na čase,
 - § statistické údaje o porovnání měřených a modelových hladin,
 - § v případě automatické kalibrace i statistické údaje o váhových koeficientech, hodnotě cílové funkce a dalších statistikách,
- porovnání vyhodnocené a modelové drenáže podzemní vody do úseků toků:
 - § tabulky vyhodnocené a modelové drenáže (infiltrace) podzemní vody do/z úseků toků (včetně uvedení rozdílu mezi vyhodnocenou a modelovou drenáží),

- § vzájemné porovnání vyhodnocené a modelové drenáže v grafu,
 - § při transientní simulaci – graf vyhodnocených a modelových drenází v závislosti na čase,
 - § statistické údaje o porovnání měřené a modelové drenáže,
 - § v případě automatické kalibrace i statistické údaje o váhových koeficientech, hodnotě cílové funkce a dalších statistikách,
- porovnání vyhodnocených a modelových koeficientů hydraulické vodivosti:
 - § tabulky vyhodnocené a modelové hodnoty hydraulické vodivosti (včetně uvedení rozdílu mezi vyhodnocenou a modelovou popis výsledků kalibrovaného modelu,
 - § grafické porovnání měřených a modelových hydraulických vodivostí (-logK, -logK) a grafické porovnání měřených hydraulických vodivostí a modelových rozdílu hydraulické vodivosti (-logK, diffK),
 - popis míry nejistoty modelové simulace, rekapitulace statistických veličin automatické kalibrace, identifikace parametrů s nejmenší oporou v měřených datech, doporučení prací a jejich priorit pro snížení modelových nejistot.

V každé pasáži o kalibraci modelu by mělo být uvedeno, zdali byly při kalibraci modelu využity metody automatické kalibrace a na jaké parametry se provedená automatická kalibrace vztahovala.

Výhodou aplikace metod automatické kalibrace jsou např. statistiky o:

- významnosti jednotlivých parametrů modelu,
- množství dostupných údajů pro kalibraci jednotlivých parametrů modelu,
- korelaci mezi jednotlivými parametry,
- pravděpodobném rozsahu modelového parametru.

Metodami automatické kalibrace lze modelové řešení „pouze zlepšit“ – pokud automatická kalibrace z nějakých důvodů (např. „vysychání“ modelu) nepřinese lepší výsledek, je modelové řešení ponecháno ve stavu před jejím zahájením.

2.5. Výstupy (a výsledky) modelu proudění podzemní vody

Prezentace výsledků modelu by měla být vždy podřízena vytyčeným cílům realizace modelu.

Následný přehled modelových výstupů se zaměřuje na ucelený přehled možných modelových výstupů.

Výstupy stacionárních simulací:

1. izolinie hladin podzemní vody v m n.m. (s vykresleném měřených hladin, popřípadě izolinií konstruovaných z měřených dat),
2. směry proudění podzemní vody (šipky vektorů rychlostí, popřípadě trajektorie částic v proudu podzemní vody),
3. snížení hladin podzemní vody (vyvolané odběry podzemní vody či jinými antropogenními zásahy /s vykreslenými naměřenými poklesy hladin ve vrtech, popřípadě i s izoliniemi poklesu konstruovanými z měřených dat/),
4. tabelární vyčíslení bilance podzemní vody – sumární i rozdělené pro jednotlivé oblasti infiltrace, toky, odběry podzemní vody či jejich skupiny,
5. grafické zpracování bilance podzemní vody – sumární i rozdělené pro jednotlivé oblasti infiltrace, toky, odběry podzemní vody či jejich skupiny,

6. vyčíslení průtoku podzemní vody přes libovolné profily (i pro jednotlivé kolektory),
7. vykreslení dob zdržení podzemí vody (s možností porovnání s bodovými údaji izotopového stáří podzemních vod).

Výstupy transienčních simulací:

1. úrovně hladin podzemní vody ve vybraných místech (vrtech) v závislosti na čase,
2. drenáž podzemní vody do toků v závislosti na čase,
3. tabelární vyčíslení bilance podzemní vody v závislosti na čase – sumární i rozdělené pro jednotlivé toky a odběry podzemní vody či jejich skupiny,
4. grafické zpracování bilance podzemní vody v závislosti na čase – sumární i rozdělené pro jednotlivé toky a odběry podzemní vody či jejich skupiny

Grafické a tabelární výstupy modelových řešení proudění podzemní vody je vhodné doplnit textovým komentářem popisujícím poměry v lokalitě.

3. Umělá infiltrace

Modelové řešení oblastí s umělou infiltrací vyžaduje aplikaci shodných metod modelování jako v oblastech bez umělé infiltrace.

Zvýšenou pozornost je nutné věnovat:

- Ø při zpracování **koncepčního modelu** – popisu umělé infiltrace (typu objektů pro zasakování (vrty, plošné objekty), typu objektů pro čerpání (např. širokoprofilové vrty), předpokládaného vlivu zasakování a odběru podzemní vody na současné poměry proudění podzemní vody),
- Ø při **vymezení a diskretizaci modelového území** – horizontální diskretizaci volit i na základě znalostí „technických“ parametrů umělé infiltrace (např. množství objektů pro zasakování a pro odběr podzemní vody), vertikální diskretizaci volit na základě:
 - detailní znalosti geometrie kolektoru mezi zasakovacími a jímacími objekty,
 - identifikace propustných a nepropustných vrstev mezi povrchem terénu (zasakovacími objekty) a kolektorem s jímacími objekty,
 - znalosti lokálních hydraulických poměrů v prostoru infiltrace.
- Ø při **zadání okrajových podmínek** – pro zasakování vody do struktury a pro odběry podzemní vody,
- Ø při **realizaci a kalibraci modelu** – na zpracování tranzientních simulací proudění podzemní vody a kalibraci kapacitních parametrů prostoru modelu.

Případné doplňující metodické postupy mohou vyplývat z požadavku predikce množství infiltrované vody (přes původně nenasycenou zónu), která vyžaduje oproti obvyklým modelům následující informace a postupy:

- detailní znalost lokálních hydraulických poměrů v prostoru infiltrace (v místech umělé infiltrace nastává obvykle třírozměrné proudění s vertikální složkou pohybu podzemní vody):
 - § identifikovat nejméně propustné vrstvy (na základě zrnitostních rozborů a hydraulických zkoušek propustnosti odebraných vzorků),

- § stanovit hydraulické charakteristiky proměnlivě nasycené zóny (průběh retenční čáry a předpověď nenasycené hydraulické vodivosti)
- minimálně v oblasti umělé infiltrace je třeba zpracovat detailní třírozměrný model proudění, kombinující nasycené a proměnlivě nasycené proudění podzemní vody (např. Feflow)

Je třeba se zabývat i možnostmi poklesu propustnosti horninového prostředí s umělou infiltrací v důsledku inkrustace minerálů.

4. Rešerše a testování softwaru

4.1. Úvod

S ohledem na specifika otázek zasakování do kvartérních kolektorů byla provedena stručná rešerše dvou softwarů s rozdílnou metodou matematického řešení.

- MODFLOW – metoda konečných diferencí, (MODFLOW je vyžíván v modelovacích „programech“ (pre- a post procesor, vizualizace a další) Groundwater Vistas, Visual Modflow, GMS – Groundwater modeling system i dalších),
- FEFLOW – metoda konečných elementů (zahrnuje vlastní pre- a post-procesor a vizualizaci).

Oba softwary jsou veřejně (resp. komerčně) dostupné a jsou hojně využívány pro modelová řešení řady situací.

4.2. MODFLOW

MODFLOW (Harbaugh, 2005) je modulární třídímenzionální model proudění podzemní vody v nehomogenním anizotropním prostředí. Je založen na konceptu vodorovných zvodní s napjatou nebo volnou hladinou nebo jejich kombinaci, ve kterých je proudění podzemní vody řešeno odděleně pro jednotlivé zvodnělé vrstvy. Vzájemná interakce vrstev je vyjádřena vertikálním přetokem z jedné vrstvy do druhé, který je buď přímo zadán, nebo je vyčíslen z vertikálních hydraulických vodivostí sousedních vrstev.

Proudění podzemní vody v horninovém prostředí je v programu MODFLOW simulováno metodou konečných rozdílů na blokově centralizované síti. Oblast proudění je jednoznačně vymezena polohou spodního a horního okraje zvodně (modelové vrstvy) a hranicí zájmové oblasti. Kromě simulace proudění ve směru hydraulického gradientu dle zadaných okrajových podmínek na hranici modelu, lze programem MODFLOW řešit také tok z externích zdrojů – tok ze studní, plošné infiltrace, evapotranspirace, podzemních drénů nebo říčních toků.

Pro program MODFLOW bylo napsáno mnoho doplňujících programů (modulů) a pre- a postprocesorů, které nejsou integrovány přímo v MODFLOW, ale komunikují navzájem prostřednictvím daných souborů vstupních a výstupních souborů. Každý z nich řeší specifické systémy rovnic, které významně rozšiřují možnosti použití MODFLOW pro řešení hydrogeologických úloh (např. MODPATH – modul na sledování částic k vyhodnocení trajektorie a doby proudění, MT3D, MT3DMS – tzv. transportní modely, PEST (Parameter Estimation) – modul sloužící k automatickému odhadu parametrů modelu a dalších).

4.2.1. Aplikace programu MODFLOW při řešení hydrogeologických úloh

Horninové prostředí je v programu MODFLOW popsáno pomocí hydraulických vlastností – hydraulickou vodivostí, pórovitostí a storativitou. Popis prostředí pomocí těchto parametrů vychází z použitého numerického popisu proudění podzemní vody (řešení proudění pomocí Darcyho rovnice) a z konceptu ekvivalentního kontinua (EC, equivalent continuum), který je použit k diskretizaci modelového prostoru do pravoúhlé sítě buněk o konečném objemu. Každá výpočetní buňka reprezentuje odpovídající objem horninového prostředí s hydraulickými parametry (vlastnostmi) průměrovanými přes celou buňku. Program MODFLOW je proto používán nejčastěji při řešení úloh v průlinově propustném prostředí, ve kterém voda vyplňuje vzájemně propojené póry mezi zrny pevné fáze – např. při hodnocení zásob podzemní vody, simulacích čerpacích zkoušek, šíření znečištění apod.

4.2.2. Matematický popis pohybu podzemní vody v programu MODFLOW

Numerický popis proudění podzemní vody použitý v programu MODFLOW je detailně popsán v manuálu programu Harbaugh, 2005. V této kapitole jsou vybrány a syntetizovány základní rovnice a principy, na kterých jsou založeny simulace hydrogeologických úloh v tomto programu.

Program MODFLOW řeší nestacionární třírozměrné proudění vody o konstantní hustotě v nehomogenním neizotropním prostředí, které je popsáno kombinací pohybové rovnice a rovnice kontinuity. Pohybová rovnice je popsána Darcyho zákonem ve tvaru:

$$v_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, v_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, v_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z},$$

kde v_x, v_y, v_z jsou složky vektoru hustoty toku (průtok na jednotkovou plochu) ve směru os souřadného systému [m.s^{-1}], K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} jsou diagonální složky tenzoru koeficientu hydraulické vodivosti [m.s^{-1}] (za předpokladu nulových hodnot složek tenzoru koeficientu hydraulické vodivosti K_{xy}, K_{xz}, K_{yz} ležících mimo diagonálu, tj. pro souřadný systém paralelní s hlavními směry tenzoru hydraulické vodivosti), h je hydraulická výška [m] a $\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z}$

jsou hydraulické gradienty ve směru os souřadného systému [-].

Základní parciální diferenciální rovnice řešená programem MODFLOW (řídící rovnice proudění) má tvar:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (5.2)$$

kde W objemový tok (průtok na jednotkový objem) reprezentující zdroje a propady s hodnotami $W < 0$ pro odtok z modelu a $W > 0$ pro přítok vody do modelu [s^{-1}], S_s je specifická storativita horninového prostředí [m^{-1}] a t je čas [s].

Obecně mohou být hydraulické parametry S_s, K_{xx}, K_{yy} a K_{zz} prostorovou funkcí polohy $S_s = S_s(x, y, z), K_{xx} = K_{xx}(x, y, z), K_{yy} = K_{yy}(x, y, z), K_{zz} = K_{zz}(x, y, z)$ (tj. prostředí může být heterogenní a anisotropní) a W může být funkcí prostoru a času $W = W(x, y, z, t)$. Tato rovnice doplněná o počáteční a okrajové podmínky představuje matematický popis proudění podzemní vody. Jejím numerickým řešením získáme aproximaci funkce $h(x, y, z, t)$, která určuje hodnotu hydraulické výšky v prostoru a čase v dané oblasti.

4.2.3. Prostorová diskretizace modelové oblasti a řídící rovnice proudění

Pro numerické řešení rovnice pomocí metody konečných rozdílů je nutná diskretizace (převod spojité funkce na diskrétní) modelové oblasti do konečného množství pravoúhlých výpočetních buněk. V každé výpočetní buňce je bod označovaný jako “uzel” (node), ve kterém je počítána funkce $h(x, y, z, t)$. V programu MODFLOW je nicméně řídící rovnice proudění v diskretizovaném tvaru odvozena na blokově centralizované síti s uzlem umístěným ve středu (těžišti) výpočetní buňky.

Odvození řídící rovnice proudění v diskrétním tvaru metody konečných rozdílů vychází z použití rovnice kontinuity, tj. součet všech toků z a do buňky musí být roven rychlosti změny objemu (zásobnosti) v buňce. Za předpokladu, že je hustota podzemní vody konstantní, má rovnice kontinuity vyjadřující bilanci toku pro výpočetní buňku tvar:

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V,$$

kde Q_i jsou přítoky a odtoky do/z buňky [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$], které jsou sumarizovány přes všechny sousední výpočetní buňky, SS specifická storativita, podobně jako S_s v obecné řídící rovnici

proudění, tj. objem vody, který způsobí v jednotkovém objemu zvodně změnu hladiny o 1 m [m^{-1}], DV objem buňky [m^3] a Dh změna hladiny [m] v časovém kroku Dt [s].

Pro odvození řídicí rovnice v diskrétním tvaru je zavedeno několik zjednodušení:

- kladná hodnota toku odpovídá přítoku vody do výpočetní buňky i,j,k ,
- záporná hodnota toku odpovídá odtoku vody do výpočetní buňky i,j,k ,
- ze všech členů diskrétní rovnice je odstraněno záporné znaménko vystupující v Darcyho pohybové rovnici.

4.2.4. Okrajové podmínky modelu

Při numerickém řešení hydrogeologických úloh je nutné zadat okrajové a počáteční podmínky modelu. V programu MODFLOW je možné zadat všechny tři základní typy okrajových podmínek:

- okrajová podmínka prvního typu (Dirichletova), která definuje předepsanou hodnotu hydraulické výšky na hranici modelu. V programu MODFLOW je zadávána do jednotlivých výpočetních uzlů a může být:
 - o funkcí pouze polohy $H = f(x,y,z)$ pro stacionární úlohu nebo
 - o funkcí polohy a času $H = f(x,y,z,t)$ pro transientní úlohy.
- okrajová podmínka druhého typu (Neumannova), která definuje předepsanou hodnotu toku na hranici modelu. V programu MODFLOW je tato podmínka zadávána pomocí externího zdroje/propadu, tj. pomocí studny, která je zadávána do jednotlivých výpočetních uzlů. Speciálním případem této okrajové podmínky je nepropustná hranice (složka hustoty toku kolmá k hranici je rovna nule), která je na hranici modelu předpokládána automaticky v případě nespecifikování žádné okrajové podmínky. Stejně jako okrajová podmínka konstantní hydraulické výšky může být i tato podmínka:
 - o funkcí pouze polohy $v = f(x,y,z)$ pro stacionární úlohu nebo
 - o funkcí polohy a času $v = f(x,y,z,t)$ pro transientní úlohy.
- okrajová podmínka třetího typu (smíšená okrajová podmínka, Cauchyho okrajová podmínka polopropustné hranice), která se vyskytuje tam, kde je oblast proudění v kontaktu s otevřeným vodním zdrojem (nebo jiným porézním prostředím), ale je oddělena polopropustnou vrstvou. V programu MODFLOW je zadávána do jednotlivých výpočetních uzlů jako externí zdroj/propad a v rámci numerického řešení je diskretizována do rovnice. Opět může být funkcí polohy nebo funkcí polohy a času.

4.3. FEFLOW

Modelovací program FEFLOW je založen na metodě konečných prvků, ale poskytuje srovnatelný rozsah vlastností a možností použití jako klasické hydrogeologické modelové programy založené na metodě konečných diferencí. Výhodami, které poskytuje díky této metodě řešení oproti např. programu MODFLOW, je:

- lepší reprezentaci částí modelů jako jsou řeky, zlomy, umístění hydrogeologických objektů atd. díky vysoké adaptibilitě sítě,
- lepší reprezentace (přesnější geometrie) povrchů vrstev a anizotropie prostředí,
- možnost lokálního zahuštění sítě bez potřeby zahuštění celé řádky/sloupců,
- možnost využití pohyblivé sítě pro výpočet volných povrchů (např. hladina podzemní vody),
- automatické zjemnění/“zhrubnutí“ sítě,
- menší výpočetní nároky vlivem redukce množství elementů v rozsáhlých modelech,
- široký rozsah aplikace na různá měřítka (i v rámci regionálního modelu může být efektivně řešen detail).

Oproti metodě konečných diferencí má ale metoda konečných elementů použitá ve FEFLOW **některé nevýhody**, které do jisté míry omezují její použití. Jedná se hlavně o:

- komplexnější teorie vyžadující hlubší znalosti matematiky,
- nespojitost rychlostí na hranicích elementů,
- není zaručena lokální hmotová bilance, nelze hmotově přesně bilancovat části modelové oblasti.

Současné systémy rovnic pro řešení pokročilých modelů proudění podzemní vody vedou k nezbytnosti řešení velkých maticových systémů. Transientní modelové výpočty komplexních regionálních modelů pro dlouhé časové úseky vyžadují značné výpočetní úsilí a i za použití nejnovějšího hardwaru může docházet k neúnosnému prodloužení doby simulace.

Matematické modelování v aplikaci FEFLOW je založeno na základních fyzikálních principech:

- zachování hmoty tekutého a pevného kontinua,
- zachování hmoty kontaminantů a chemických složek,
- zachování hybnosti tekutého a pevného kontinua,
- zachování energie (první zákon termodynamiky).

Vybrané možnosti simulací v programu FEFLOW:

- Stacionární nebo transientní simulace;
- Různé metody zadání časové diskretizace řešení:
 - konstantní časové kroky,
 - proměnlivé předdefinované časové kroky,
 - plně automatický volba časového kroku využívající schéma prediktor-korektor, nebo aressive target;
- Různé přístupy k výpočtu volné hladiny:
 - pohyblivé sítě,
 - linearizovaný vztah mezi nasycením a relativní vodivostní křivkou s reziduální úrovní hladiny,
 - plně nenasyčených modelování;
- Automatická kalibrace nástroj na bázi PEST;
- Efektivní řízení procesu simulace pomocí přizpůsobitelných real-time diagramů pro všechny důležité výsledky modelu.

- Interaktivní 3D rotace a zoom; 3D pohled na modelovou oblast (sít' konečných prvků, vlastnosti materiálů; vypočtené distribuce) s izoliniemi, 3D isopovrchy, řezy apod.;
- 2D zobrazení s izoliniemi, vektory rychlosti, podkladovými mapami atd., jako vertikální řezy nebo horizontální projekce.
- Zobrazení výsledků particle trackingu s označenými izochronami,
- Rozsáhlé funkce exportu: vektorová grafika (ESRI Shape, DXF, FEFLOW Plot, ASCII), datové trojice/čtveřice, bodové diagramy atd;
- Vytvoření obrázků s rozsáhlými dalšími možnostmi (na pozadí mapy, s legendami, rámečky, textem, atd.) v interní aplikaci FEPLLOT;
- Analýza výsledků v každém kroku, stejně jako diferenciální operace;
- Srovnání s referenčními daty a distribucemi dat;
- Pro tvorbu diagramů bilance hmoty a energie v modelové doméně nebo jeho části s využitím "budget analyzer" nástroje;
- Výpočet toku přes řez doménou nebo jednotlivou vrstvu pomocí nástroje "fluid flux analyzer";
- nástroj FEFLOW Explorer pro 3D vizualizace, animace a video export vlastností modelu a výsledků simulace.

Další možnosti využití programu FEFLOW (mimo oblasti proudění podzemní vody) je simulace transportu roztoků a tepla.

4.3.1. Aplikace programu FEFLOW při řešení hydrogeologických úloh

FEFLOW je vhodný pro mnoho různých aplikací při analýze a simulaci proudění a transportních procesů v porézním prostředí, od měřítka laboratoře až po kontinentální měřítko. Obvykle řešené úlohy jsou v hydrogeologii:

- Studie šíření znečištění, hodnocení sanační a dekontaminační strategie,
- Studie pohybu hladiny podzemní vody;
- Studie odvodňování důlních děl a těžebních jam;
- Výpočet stárí vody podle izotopů;
- Návrhy geotermálních elektráren (tepelná čerpadla);
- Propojení simulace proudění podzemní a povrchové vody prostřednictvím propojení s Mike11 a Hydro_AS-2D;
- Geotechnické aplikace (tunelové stavby, odvodňovací stavby);
- Výpočet průsaku hrázemi;
- Výpočty infiltrace;
- Posouzení využitelnosti zdrojů podzemních vod;
- Návrh ochranných pásem;
- Návrhy monitoringu hladiny a kvality podzemní vody;

4.3.2. Vstupní data, okrajové a počáteční podmínky

Počáteční podmínky (startovací úroveň hladiny), okrajové podmínky a hydraulické parametry jsou v programu FEFLOW sdruženy pod pojem hydraulické vlastnosti.

Počáteční podmínky:

Jedná se o distribuci hladin podzemní vody, která je použita pro iniciační hodnotu hladiny ve výpočetních uzlech při modelovém výpočtu (pro první krok transientní simulace).

Okrajové podmínky:

Okrajové podmínky jsou zadány na hranici modelové domény a mohou být zadány i uvnitř modelové domény. Obecně se zadávají do povrchů oddělujících vrstvy. FEFLOW podporuje při výpočtu proudění čtyři následující typy okrajových podmínek:

- 1. typu (HEAD) – Dirichletova okrajová podmínka konstantní úrovně hydraulické výšky,
- 2. typu (FLUX) – Neumanova okrajová podmínka konstantního průtoku přes určitý segment hranice (přes plochu – musí být zadána nejméně do dvou sousedních uzlů),
- 3. typu (TRANSFER) – Newtonova okrajová podmínka závislosti průtoku přes segment hranice na rozdílu vypočtené a zadané hodnoty hladiny podzemní vody,
- 4. typu (WELL) - podmínka konstantní hladiny nebo konstantního průtoku definující bodový nebo jednodimenzionální (multilayer) zdroj/propad.

Všechny okrajové podmínky je při transienčních simulacích možné zadat pomocí časové distribuční funkce. Každá okrajová podmínka může být dále podmíněna (omezena) v platnosti další hodnotou nazývanou „constrain“. Např. čerpané množství ve studni může být omezeno nejnižší úrovní hladiny pro tuto studnu. Při poklesu hladiny pod tuto úroveň okrajová podmínka 4. typu pozbuje platnost.

Hydraulické parametry:

Základním hydraulickým parametrem je koeficient hydraulické vodivosti, který se do jednotlivých konečných elementů zadává pomocí tří hodnot odpovídajících diagonále tenzoru hydraulické vodivosti (K_{xx} , K_{yy} , K_{zz}) ve 3D a dvou hodnot maximální hydraulické vodivosti a faktoru anisotropie (K_{max} a K_{min}/K_{max}) ve 2D. Storativita je do modelu zadána ve formě porozity pro volnou zvědeň a ve formě specifické storativity (stlačitelnosti) pro zvědeň napjatou.

Plošná infiltrace/drenáž je jedinou okrajovou podmínkou, která se díky své specifičnosti plošného zadání obvykle na povrch nebo bázi (nebo obě hranice) definuje v nabídce hydraulických parametrů.

Parametr zdroj/propad se definuje zadáním plošné hodnoty. Stejně jako u plošné infiltrace/drenáže se jedná spíše o okrajovou podmínku než o materiálovou vlastnost, protože se ale zadává do elementu a ne do uzlu, je ve FEFLOW přiřazena k hydraulickým parametrům.

Konduktance označovaná ve FEFLOW jako „transfer rate“ je hodnota, která definuje odpor pro komunikaci podzemní a povrchové vody, která je do modelu přiváděna (z modelu drénována) okrajovou podmínkou 3. typu simulujícího toku. V programu je oddělena hodnota pro infiltraci a pro drenáž, což zohledňuje možnost, že odpor dna toku je různý v závislosti na směru proudění.

Hydraulické parametry lze zadat pro celou síť, jednotlivé elementy, zvolený čtyřúhelník, nebo pomocí databáze hodnot a polygonů připravených v GISu. Hodnoty mohou být mezi vrstvami kopírovány. Existují zde také možnosti specifického zadání hydraulických parametrů, například uživatelem specifikovaná anizotropie vodivosti, nebo závislosti velikosti zdroje/propadu na jiných parametrech (např. nadmořské výšce) na základě analytického uživatelem definovaného výpočtu.

V modelové doméně v programu FEFLOW lze definovat i tzv. diskrétní prvky (discrete feature elements). Jedná se o 1D nebo 2D prvky, které mohou být interaktivně vloženy do modelové simulace proudění a transportu. Diskrétní prvky představují konečné elementy nižší dimenzionality, které lze definovat na hranách a stěnách elementů nebo na spojnicích uzlů (ve 2D) existující modelové sítě konečných prvků. Znamená to, že dimenze diskrétních elementů je vždy alespoň o jedna nižší než dimenze modelové domény. Tyto diskrétní prvky jsou užitečné při modelovém popisu puklin v horninách, zlomů, vrtů, tunelů, říčních koryt, kanálů, drenáží, těžebních prostor atd., což znamená pro simulaci různých typů preferenčních cest proudění a transportu. Teorie implementace tohoto typu konečných prvků do výpočtů je značně složitá.

Pro popis proudění vody v diskrétních elementech je možné použít různé zákony (formulace rovnice proudění):

- Darcyho rovnice – pro proudění v porézním prostředí,
- Hagen-Poiseuilleova rovnice – pro proudění v puklinách,
- Manning-Stricklerova rovnice – pro proudění v povrchových tocích.

4.3.3. Výsledky, testování a vizualizace

Po zadání všech požadovaných modelových parametrů (vstupních dat) je možné model spustit. Přitom dojde k automatickému přepnutí programu do režimu simulátoru. Po spuštění simulace dojde k aktivaci zvoleného „solveru“ a zároveň k přípravě běhu numerické simulace. Simulátor dynamicky alokuje potřebnou paměť pro všechna simulační data a pracovní pole v závislosti na geometrii sítě a typu simulace. Dynamická alokace zaručuje, že paměť bude využita maximálně efektivně. Simulátor otevře všechna relevantní nebo uživatelem požadovaná okna s diagramy, ve kterých je dynamicky vizualizován průběh simulace. Pokud dojde po skončení výpočtu k opětovnému spuštění simulátoru, začíná výpočet znovu. Je však třeba mít na zřeteli, že pole iniciálních podmínek (startovací hladiny, počáteční distribuce teplot a koncentrací) jsou při tomto výpočtu přepsána výsledky předchozí simulace.

Výpočet lze kdykoli přerušit a zobrazit aktuální výsledky ve formě izoliní, vektorů, konturových map, vertikálních řezů nebo 3D distribučních diagramů. Tato zobrazení mohou být ukládána a následně dále editována. Po opuštění menu prohlídky výsledků je možné znovu obnovit běh výpočtu.

Budget analyzer (součást programu FEFLOW) je nástroj pro velmi přesné stanovení bilance modelového řešení v rámci zadaných okrajových podmínek a analýzy plošných toků (infiltrace/drenáž), který počítá množství vody a množství transportované látky, které vstupuje nebo opouští modelovou doménu, subregion nebo vybranou modelovou hranici. Takto stanovená bilance je založená pouze na součtu hodnot v uzlech, kde je definována plošná infiltrace/drenáž nebo některá z typů okrajových podmínek.

Nástroj Fluid Analyzer poskytuje odhad velikost průtoku přes uživatelem definovanou plochu/linii (řez doménou) nebo podél hranic oblasti. Úsek definovaný uživatelem je rozdělen na malé části a průtok přes každou část je stanoven ze součinu plochy/délky části úseku a rychlosti proudění v této části úseku. Rychlost použitá pro výpočet je hodnota střední hustoty toku projektované do určitého směru (analýza horizontální/vertikální složky toku), která je pro každý uzel vypočtena jako sekundární hodnota z interpolace rychlostí stanovených v okolních výpočetních elementech (kde byla stanovena z hydraulické vodivosti a hydraulického gradientu – primárně vypočtená hodnota). Tento nástroj není určen ke stanovení bilance modelového řešení jako je tomu u nástroje budget analyzer, ale spíše jako možnost další analýzy vypočtené distribuce Darcyho rychlosti (střední hustoty toku). Nepřesnosti výpočtu průtoku přes definovanou linii/řez doménou jsou dané tím, že použitá velikost rychlosti je sekundární výpočet simulace, a navíc že vektory rychlosti jsou z bodových hodnot pro uzly projektovány na určitou část stanoveného úseku.

Při analýze a postprocesingu výsledků nabízí FEFLOW možnosti různých výpočtů, které umožňují analyzovat prostor řešení jako je například výpočet rozdílu úrovně báze modelu a hladiny podzemní vody (zvodnělá mocnost) nebo k výpočtu rozdílů hladin vypočtených ve dvou libovolných vrstvách atd. Dále je možné zvolit libovolné vypočtené pole hodnot jako referenční a toto pole pak použít ke srovnání rozdílů s následnou modifikovanou simulací.

4.4. Závěr

Oba hodnocené a testované programy (MODFLOW a FEFLOW) jsou vhodné pro simulaci zasakování vod do vod podzemních a pro hodnocení čerpání těchto vod (umělá infiltrace).

Program FEFLOW má více nástrojů pro hodnocení výpočtu v průběhu simulace a vyčíslení bilancí, přesto nemusí být zaručena lokální hmotová bilance a nelze hmotově přesně bilancovat části modelové oblasti, což patří mezi největší nevýhodu programu.

Program MODFLOW je uživatelsky „příjemnější“ a z jeho výsledků lze dosáhnout přesného vyčíslení bilance podzemních vod a hodnocení proudění podzemních vod.

Program MODFLOW (v modelovacím softwaru Groundwater Vistas) byl testován při simulaci proudění podzemí vody v širším okolí komplexu umělé infiltrace Káraný (kapitola 4).

5. Ukázka modelového řešení na lokalitě Káraný

5.1. Stručný přehled jímání podzemní vody

Pro Úpravnu vody Káraný (její provoz byl zahájen v roce 1914) je pomocí násoskových řadů jímána podzemní voda z více než 650 studní. Studny (tzv. klasické zdroje) jsou vybudovány v údolní nivě Jizery od obce Dražice (severně od Benátek n.Jizerou) až po ústí Jizery do Labe. Jímání je realizováno z kvartérních sedimentů. Zdrojem podzemní vody je především voda infiltrovaná přímo z toku Jizery (tzv. břehová infiltrace), voda přitékající ze sedimentů středního turonu (kolektor v podloží kvartérních sedimentů) a voda infiltrovaná ze srážek do sedimentů kvartéru.

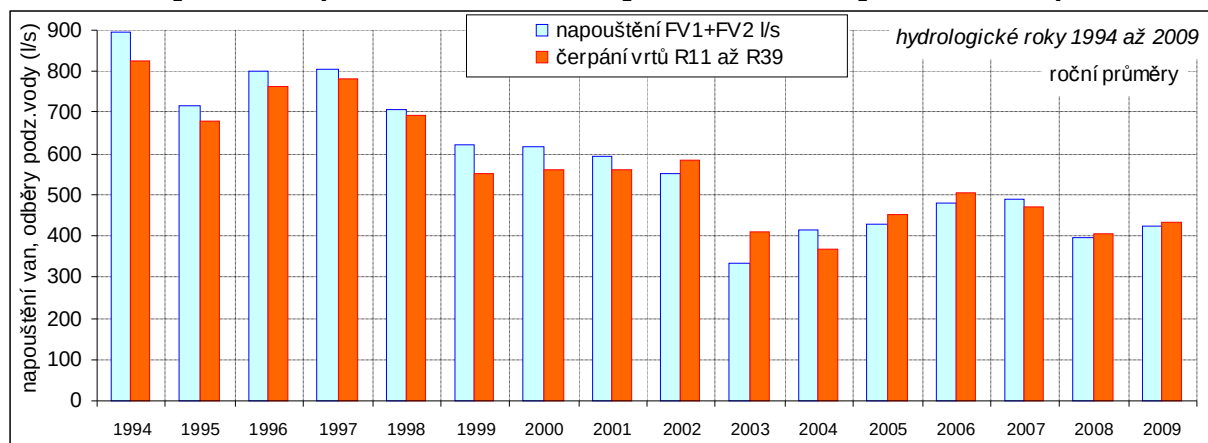
Podzemní voda jímána objekty umělé infiltrace je druhým hlavním zdrojem podzemní vody pro ÚV Káraný. Komplex umělé infiltrace byl vybudován v 60tých letech minulého století u obce Sojovice. **Součástí komplexu umělé infiltrace je:**

- 15 zasakovacích nádrží,
- 19 studní s radiálními sběrači,
- 9 sběrných studní násoskových řadů,
- 9 násoskových řadů (254 studní),
- 94 monitorovacích vrtů.

Podrobná situace objektů komplexu umělé infiltrace je zobrazena na Obr. 1 (za textem).

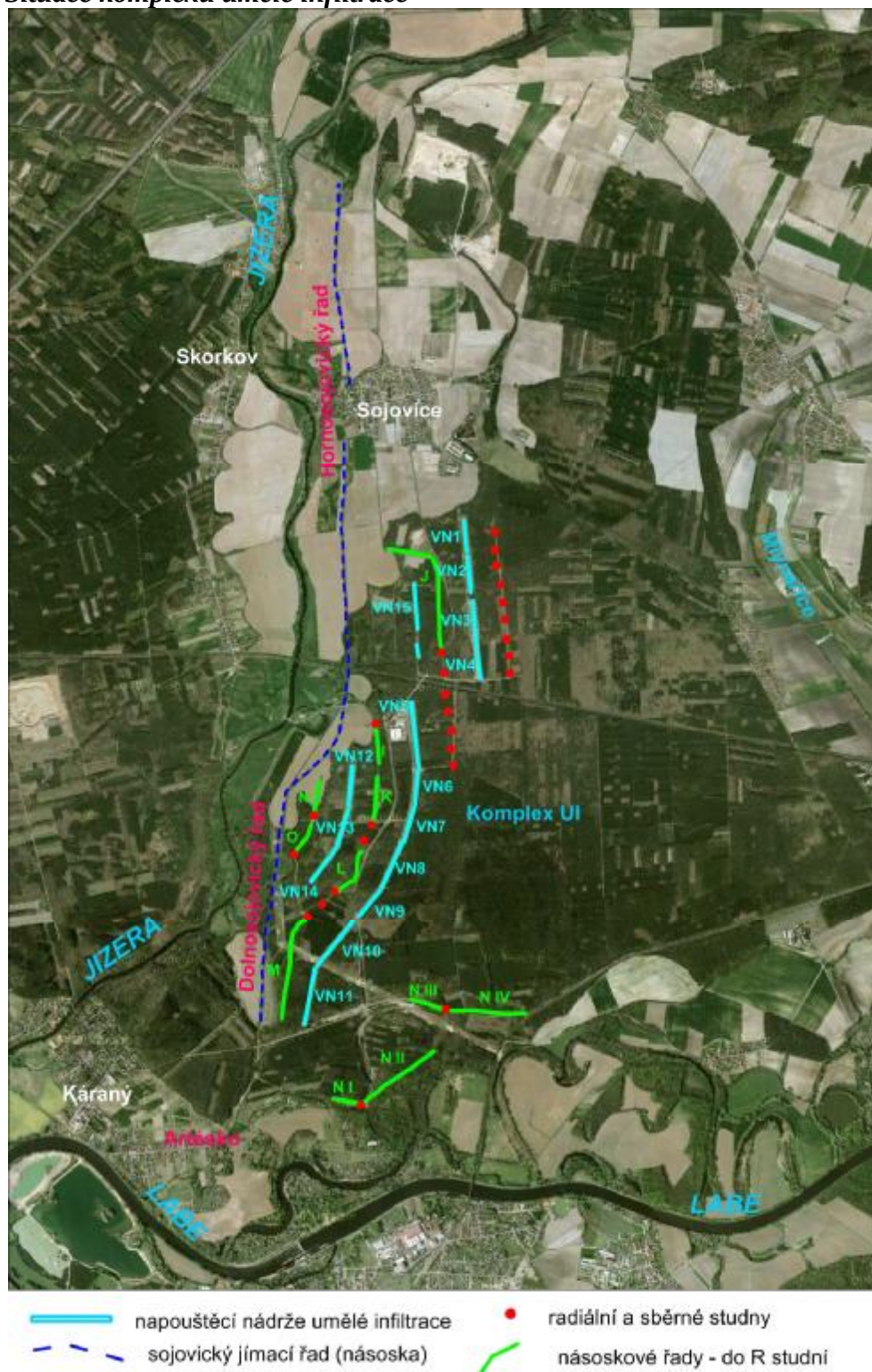
Voda z Jizery je „uměle“ infiltrována ze zasakovacích (infiltračních) nádrží do horninového prostředí a následně je jímána pomocí studní a násoskových řadů. Vydatnost infiltračního komplexu je 700 až 1000 l/s.

Průměrné napouštění infiltračních nádrží a čerpání studní v komplexu umělé infiltrace



Dalšími zdroji jímání pro ÚV Káraný je kolektor středního turonu (4 studny u obce Kochánky) a cenomanu (7 studní u soutoku Jizery s Labem).

Situace komplexu umělé infiltrace



5.2. Cíle modelování a metodika prací

Modelové řešení proudění podzemní vody v širším okolí komplexu umělé infiltrace je součástí regionálního hodnocení (modelové simulace) proudění podzemních vod v celém rozsahu jímání podzemních vod pro ÚV Káraný a detailního hodnocení proudění v prostoru komplexu umělé infiltrace a sojovických jímacích řadů.

Hlavní cíle modelování (vybrané pouze pro komplex umělé infiltrace):

1. zhodnocení režimu proudění podzemních vod v oblasti umělé infiltrace,
2. simulování snížení provozu (napouštění a čerpání) komplexu při zachování:
 - možnosti opětovného zvýšení provozu,
 - ochrany komplexu před kontaminací,
3. optimalizace provozu umělé infiltrace,

Metodika prací (vybrané části pro komplex umělé infiltrace):

- sestavení koncepčního modelu,
- stanovení průměrných přírodních zdrojů z hydrologického a hydraulického hodnocení,
- sestavení modelu proudění podzemní vody,
- kalibrace modelu proudění podzemní vody:
 - stacionární simulace proudění realizované pro dlouhodobě průměrný provoz, pro maximální a minimální provoz a pro varianty optimalizovaného provozu,
 - tranzientní simulace proudění podzemní vody v období let 1998 až 2006,
- interpretace výsledů simulací, závěrečné hodnocení.

5.3. Stručný přehled geologických, hydrologických a hydrogeologických poměrů

Prostor zájmového území je budovaný marinními sedimenty České křídové pánve (pískovce, jílovce apod.), v podloží je mocný soubor hornin permokarbonského stáří. Údolí vodních toků jsou vyplněna pleistocenními (kvartérními) fluviálními a deluviálními sedimenty.

Z hydrogeologického hlediska lze v zájmovém území vymezit **3 kolektory**: kolektor A (sedimenty cenomanu), kolektor C (sedimenty středního turonu) a kvartérní kolektor. **Kolektor cenomanu (A)** je vyvinut v perucko-korycanském souvrství. Kolektor A, tvořený především pískovci a jílovci, je souvisle rozšířen v celé ploše zájmového území s mocností v rozsahu 10 až 50 m. Hladina podzemní vody v kolektoru A je v zájmovém území napjatá. Propustnost kolektoru je průlinově puklinová a obecně klesá směrem k západu. K infiltraci vody do kolektoru A dochází na výchozech cenomanských pískovců v oblasti lužického zlomu (a podél lužického zlomu) cca 40 km sv. od Benátek nad Jizerou. Směr proudění podzemní vody je v zájmovém území od severu k jihu, přirozená drenáž podzemní vody je především do toku Labe. **Izolátor** mezi kolektory A a C tvoří slínovce spodní části jizerského a celého bělohorského souvrství.

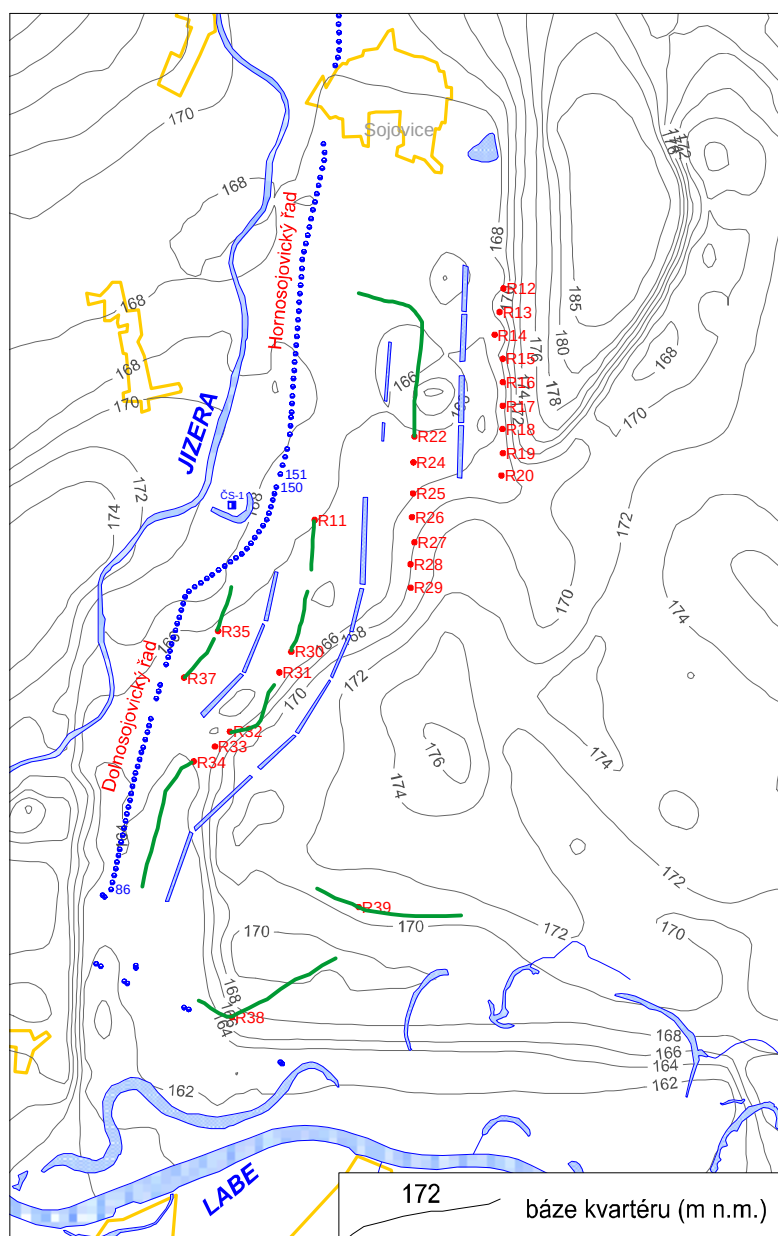
Kolektor středního turonu (C) je vázán na pískovce svrchní části jizerského souvrství. Jeho rozšíření je v zájmovém území souvislé s výjimkou jižní části zájmového území, kde kolektor jižně od obcí Sojovice a Skorkov vyklíňuje. Hladina podzemní vody v kolektoru C je většinou volná. Výjimečně může být lokálně napjatá vlivem slabě propustného pokryvu kvartérních sedimentů. Propustnost kolektoru C je puklinově – průlinová (spíše puklinová). Kolektor C je napájen infiltrací atmosférických srážek. Odvodňován je přes kvartérní sedimenty do říční sítě. Úplná drenáž kolektoru středního turonu nastává do Jizery u Sojovic a Vlkavy u Čachovic, kde vystupuje báze kolektoru C na povrch. Ostatní toky drénují kolektor C neúplně, avšak z bilančního hlediska významně. **Izolátor** mezi kolektorem středního turonu (C) a kvartéru není vyvinut.

Kolektor kvartéru je vázán na pleistocenní sedimenty v nejnižší údolní terase řeky s mocnostmi nejčastěji 5 až 15 m, místy přes 20 m. Hladina podzemní vody je volná, propustnost kolektoru je průlinová. Kvartérní kolektor je přímo dotován infiltrací srážek a přetokem podzemní vody z podložních kolektorů (A, C) a v oblastech s odběrem vody pro Úpravnu vody Káraný také břehovou infiltrací vody z Jizery, respektive z Labe. Přirozené drenážní báze tvoří v zájmovém území především Jizera a Labe.

5.4. Modelové řešení proudění podzemní vody

Simulace proudění podzemní vody (stacionární a tranzientní) byly realizovány ve dvou úrovních podrobnosti s ohledem na potřeby provozovatele jímání. V **regionální úrovni** (širší zájmová oblast) zaujímá modelové území prostor mezi regionálním drenážním tokem Labe a drenážními toky Vlkavy a Košáteckého potoka v prostoru zvodněných hornin cenomanu, středního turonu a kvartéru. Simulace slouží ke kalibraci modelových parametrů a pro získání prostorových údajů o oběhu podzemní vody (úrovně hladin podzemní vody, drenáž do toků, vydatnost pramenů, bilance množství apod.). V **lokální úrovni** (užší zájmové oblasti) je proudění podzemní vody simulováno v okolí jednotlivých jímacích řadů a v oblasti umělé infiltrace, drenážní báze oblastí tvoří tok Jizery a Labe. Jednotlivé simulace navazují na regionální modelové řešení a slouží k upřesnění informace o proudění podzemní vody v blízkém okolí jímacích řadů a umělé infiltrace. **Následující text je zaměřen pouze na lokální modelové řešení oblasti komplexu umělé infiltrace (a přilehlých sojovických jímacích řadů) a kolektor kvartéru (ve kterém je komplex umělé infiltrace vybudován).**

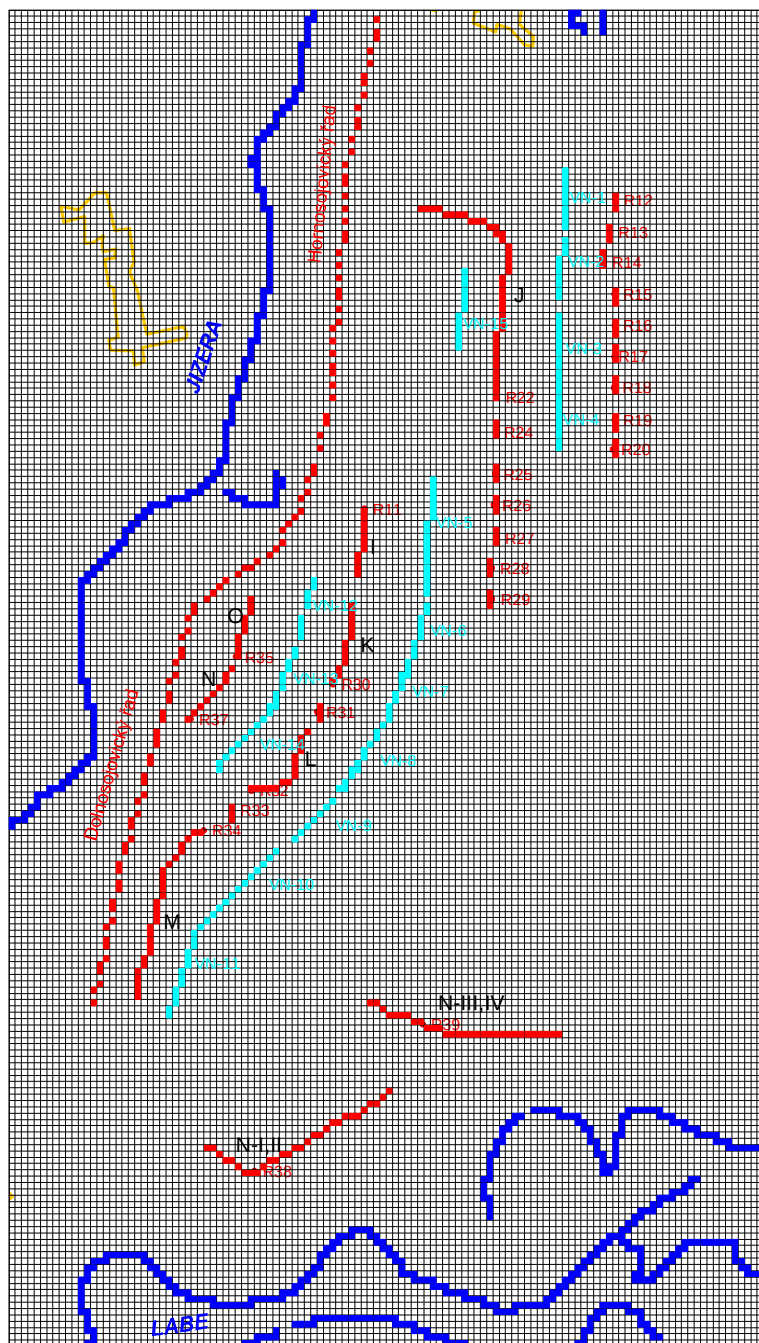
5.4.1. Diskretizace prostoru, okrajové podmínky a vybraná vstupní data



Plocha lokálního modelového řešení (s komplexem umělé infiltrace a přilehlého sojovického řadu) je rozdělena do pravidelných čtvercových elementů o straně 25 m a zaujímá území o ploše 49.8 km² (6.3 km x 7.9 km). Strop první modelové vrstvy tvoří reliéf terénu, bázi modelové vrstvy reprezentuje úroveň nepropustného podloží kvartérních sedimentů.

Báze kvartérních sedimentů (m n.m.) v prostoru komplexu umělé infiltrace (obrázek vlevo) byla konstruována z dostupné geologické dokumentace průzkumných vrtných prací a izolinií nepropustného podloží (zpracovaných před vybudováním komplexu umělé infiltrace).

Modelová síť a okrajové podmínky



Okrajovou podmínkou 2. druhu je zadáno napouštění infiltračních van (na obrázku bleděmodré křížky). Okrajovou podmínkou 3. druhu je zadána funkce toků (tmavomodré čtverce) a odběr podzemní vody (jak z objektů komplexu umělé infiltrace, tak ze sojovických jímacích řadů (červené čtverce)).

Vstupní data modelového řešení tvoří především odporové a kapacitní parametry prostředí, které vychází z vyhodnocených parametrů z čerpacích a stoupacích zkoušek. Efektivní pórovitost (při transientním řešení) byla odvozena z archivních údajů a dále kalibrována modelovým řešením. Modelovým řešením byly kalibrovány hodnoty efektivní pórovitosti pro kvartérní sedimenty v rozmezí 0.12 až 0.15 (volná hladina). *V literatuře byly pro kolektor kvartéru uváděny hodnoty efektivní pórovitosti 0.13 - 0.16 (Kněžek, 2003) resp. 0.14 (Buzek, 2001).* Srážková infiltrace byla v ploše modelu simulována na základě specifik základního podzemního odtoku pro průměrnou srážkovou infiltraci (při stacionární formě

proudění podzemní vody). Při simulaci transientního proudění podzemní vody byla srážková infiltrace proměnlivá v měsíčním kroku.

5.4.2. Realizace, kalibrace a výsledky simulací

Stacionární simulace proudění podzemní vody byly realizovány pro provoz umělé infiltrace:

- na úrovni dlouhodobě průměrného provozu komplexu (v období let 1993 až 2003),
- na úrovni maximálního provozu (cca 900 l/s),
- na úrovni minimálního provozu (cca 400 l/s při variantním řešení napouštění jednotlivých van a čerpání podzemní vody z různých objektů),
- *pro vybrané situace dle požadavků provozovatele.*

Při „základní“ stacionární simulaci proudění podzemní vody na úrovni dlouhodobě průměrného provozu komplexu (v období let 1993 až 2003), bylo do všech infiltračních van napouštěno 691 l/s vody (do van VN-1 až VN-4 a VN-15 bylo infiltrováno 314 l/s a do van VN-5 až VN-14 bylo infiltrováno 377 l/s - průměrné hodnoty za období roků 1993 až 2003). Rozložení napouštěného množství do jednotlivých van bylo rozpočteno rovnoměrně podle plochy jednotlivých van. Do modelu bylo zadáno ve formě okrajové podmínky 2. druhu (konstantní přítok). Odběry podzemní vody z objektů umělé infiltrace (a sojovických jímacích řadů) byly simulovány pomocí drenů (OP 3. typu). V oblasti umělé infiltrace byly zadány do drenů minimální hladiny v jímacích objektech, odporové parametry všech drenů byly na počátku simulace shodné a byly laděny v průběhu zpracování při porovnávání modelových a měřených dat hladin podzemní vody.

Celková bilance modelového řešení (l/s)

P Ř Í T O K Y						
kvartérní sedimenty - 1. modelová vrstva	infiltrace - srážky	infiltrace - řeka	přítok z podloží *	přítok z OP **	přítok - nap. UI	suma
CELKEM	157.4	94.9	36.7	13.4	690.5	992.9
O D T O K Y						
kvartérní sedimenty - 1. modelová vrstva	čerpání	drenáž - řeka	odtok do podloží *	odtok - OP **	přetok do nadloží	suma
CELKEM	877	49.2	47	19.7	0	992.9

* v části modelového území dochází k přetokům mezi kolektory kvartéru a středního turonu

- kolektor středního turonu (severně od obce Sojovice) je přes kvartér drénován do Jizery

** přítok ze zázemí kvartéru (ná vaznost na širší okolí)

Z Jizery je do horninového prostředí v oblasti sojovických jímacích řadů infiltrováno cca 83 l/s vody, cca 12 l/s je infiltrováno z Labe v oblasti sběrné studny R38.

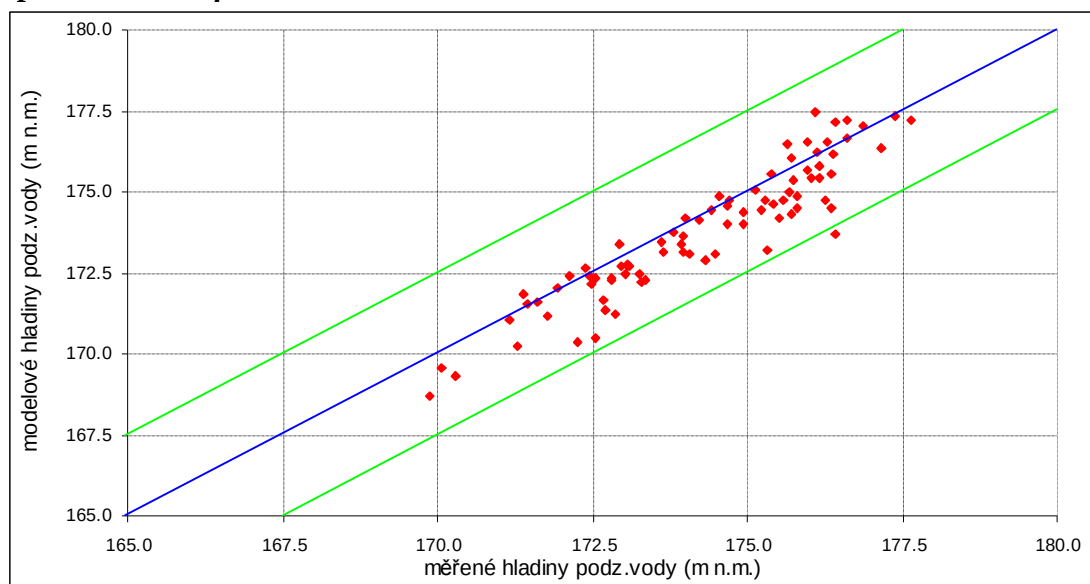
Výsledné modelové přítoky k jímacím objektům

jímací objekt	vydatnost (l/s)	jímací objekt	vydatnost (l/s)	jímací objekt	vydatnost (l/s)
R11 + násos.	40.4	R20	13.5	R31	22.8
R12	10.5	R22 + násos.	169.9	R32 + násos.	48.5
R13	12.6	R24	12.8	R33	13.6
R14	13.6	R25	11.6	R34 + násos.	66.3
R15	12.25	R26	11	R35	17.6
R16	12.9	R27	11.2	R37	16.1
R17	10.7	R28	13.6	R38	23.1
R18	15.4	R29	11.7	R39	4
R19	13.2	R30 + násos.	66.8		
<i>Dolnosojovický jímací řad</i>		<i>Hornosojovický jímací řad</i>			
st. 86 až 151	73.3	st. 151 - 190	67.2	st. 190 - 226	60.4

Výsledné odběry podzemní vody ze sojovických jímacích řadů 200.2 l/s a z objektů umělé infiltrace 675.8 l/s velmi dobře odpovídají měřeným odběrům ve sledovaném období (202.4 l/s resp. 655 l/s). Menší rozdíl mezi čerpaným množstvím z jednotlivých objektů umělé infiltrace je způsoben nerovnoměrným napouštěním infiltračních van ve skupinách FV1 a FV2 (k dispozici byly pouze sumární údaje o napouštění). Přítoky do jímacích objektů komplexu umělé infiltrace jsou především závislé na jejich vzdálenosti od infiltračních van

resp. od toku Jizery, na reliéfu nepropustného podloží a na odladěné propustnosti horninového prostředí v jejich okolí.

Grafické porovnání měřených a modelových hladin podzemní vody v pozorovacích vrtech komplexu umělé infiltrace



Absolutní shodu měřených a modelových hladin reprezentuje v grafu modrá přímka, zelené přímky interpretují shodu do 2.5 metrů.

Tabulka porovnání měřených a modelových hladin v pozorovacích vrtech komplexu UI

vrt	hladina podz.vody		rozdíl	vrt	hladina podz.vody		rozdíl	vrt	hladina podz.vody		rozdíl
	měřená	modelová			měřená	modelová			měřená	modelová	
801	171.95	172.06	-0.11	831	174.06	173.10	0.96	864	173.62	173.43	0.19
802	173.80	173.79	0.01	832	175.71	174.31	1.40	866	175.63	176.46	-0.83
803	174.71	174.75	-0.04	833	176.38	176.16	0.22	867	175.98	176.56	-0.58
804	175.14	175.08	0.06	834	176.15	175.45	0.70	868	175.96	175.71	0.25
805	173.98	173.15	0.83	835	174.93	174.03	0.90	869	172.67	171.65	1.02
806	174.94	174.41	0.53	836	174.68	174.00	0.68	870	174.68	174.57	0.11
808	176.10	177.48	-1.38	837	173.02	172.48	0.54	871	176.42	177.18	-0.76
809	176.87	177.05	-0.18	839	171.29	170.26	1.03	872	176.60	177.20	-0.60
810	175.40	175.58	-0.18	840	172.27	170.37	1.90	873	176.61	176.69	-0.08
811	174.55	174.89	-0.34	842	173.93	173.39	0.54	874	171.17	171.06	0.11
812	176.25	174.78	1.47	843	175.57	174.75	0.82	875	171.39	171.87	-0.48
813	173.09	172.75	0.34	845	174.49	173.11	1.38	876	172.47	172.17	0.30
814	173.07	172.73	0.34	846	172.80	172.31	0.49	877	171.60	171.62	-0.02
815	175.32	173.19	2.13	847	173.29	172.24	1.05	878	173.97	173.61	0.36
816	176.35	174.48	1.87	848	174.31	172.91	1.40	879	176.12	176.23	-0.11
817	177.39	177.37	0.02	849	172.87	171.26	1.61	880	176.28	176.53	-0.25
818	176.16	175.80	0.36	850	172.80	172.32	0.48	881	175.70	176.04	-0.34
819	175.80	174.49	1.31	851	173.34	172.30	1.04	882	169.88	168.70	1.18
820	172.12	172.44	-0.32	852	172.72	171.39	1.33	884	172.93	173.40	-0.47
821	173.07	172.75	0.32	853	172.56	170.50	2.06	885	174.22	174.14	0.08
822	173.26	172.49	0.77	854	173.63	173.13	0.50	886	174.41	174.44	-0.03
823	176.41	173.68	2.73	855	175.30	174.73	0.57	887	174.00	174.22	-0.22
824	175.82	174.87	0.95	856	175.73	175.39	0.34	888	170.30	169.32	0.98
825	177.63	177.22	0.41	857	176.02	175.45	0.57	889	171.78	171.19	0.59
826	177.17	176.34	0.83	858	175.43	174.61	0.82	890	172.45	172.40	0.05
827	176.36	175.57	0.79	859	170.08	169.55	0.53	891	172.55	172.36	0.19
828	175.67	175.02	0.65	861	172.40	172.68	-0.28				
829	175.23	174.41	0.82	862	172.98	172.71	0.27				
830	175.51	174.21	1.30	863	171.44	171.53	-0.09				

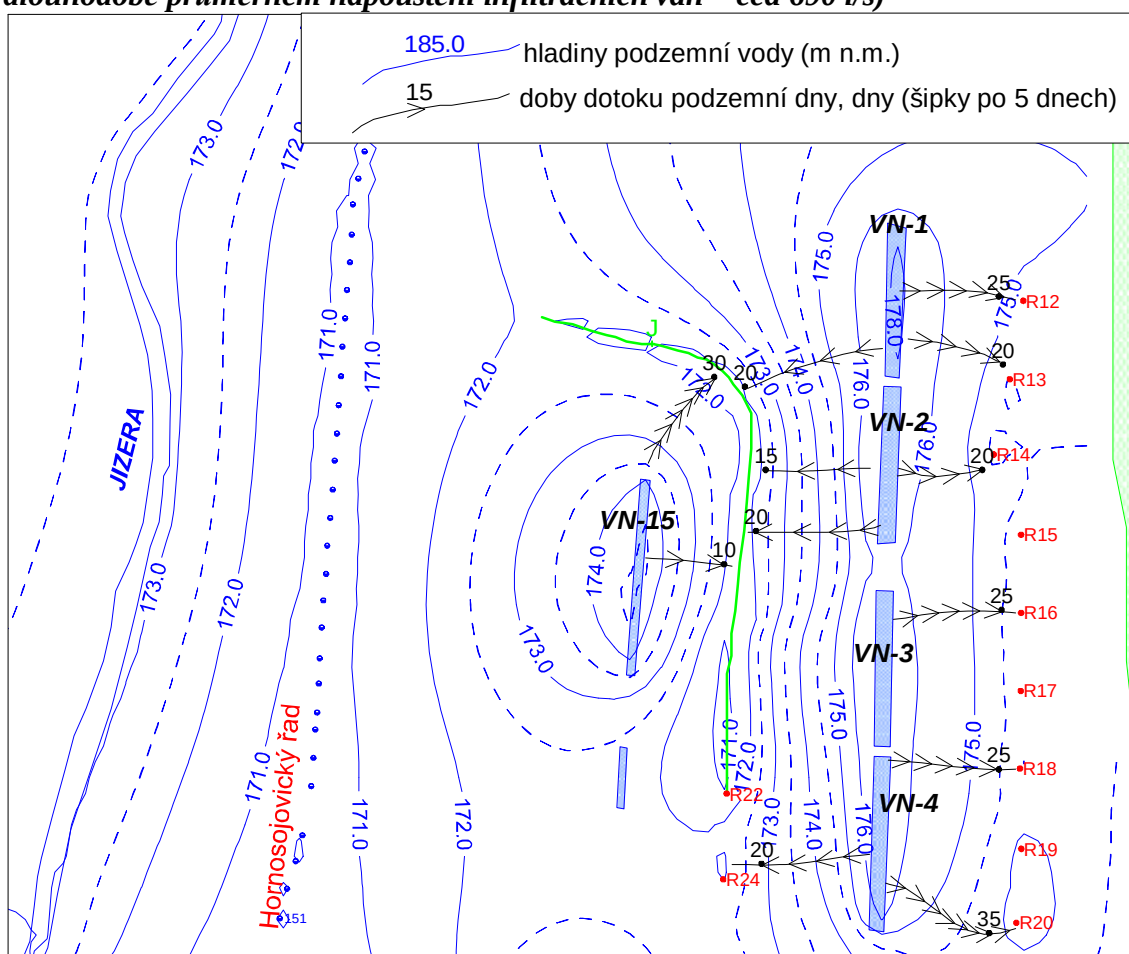
Výsledné (modelové) hladiny a směry proudění podzemní vody v kvartérních sedimentech pro celou oblast detailního modelu oblasti sojovických jímacích řadů a komplexu umělé infiltrace uvádíme na obrázku 2 (za textem).

Výsledné (modelové) hladiny a směry proudění podzemní vody v kvartérních sedimentech v širším okolí komplexu umělé infiltrace dokumentujeme na obrázcích:

- Obr.3 – maximální provoz komplexu umělé infiltrace (na úrovni napouštění cca 900 l/s),
- Obr.4 – provoz komplexu umělé infiltrace na úrovni napouštění cca 420 l/s (optimalizovaný utlumený provoz komplexu je na úrovni 400 l/s).

Doby dotoku podzemní vody od infiltračních nádrží k jímacím objektům umělé infiltrace při ustáleném proudění podzemní vody dokumentujeme na obrázku 5 (za textem). Modelové doby dotoků se u většiny objektů pohybují v rozmezí 15 až 30 dnů, s převažující dobou 20 až 25 dnů. Tyto modelové doby dobře korespondují s měřenou odezvou zvýšení čerpání jímacích objektů na zahájení napouštění nádrží.

Modelové doby dotoku v prostoru infiltračních nádrží VN-1 až VN-4 a VN15 (při dlouhodobě průměrném napouštění infiltračních van – cca 690 l/s)



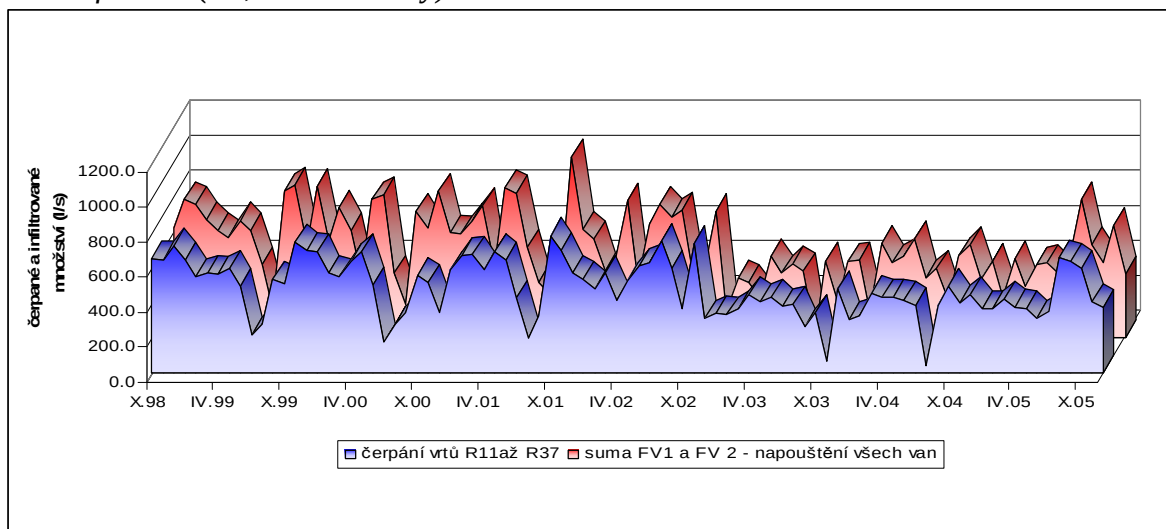
Při modelovém řešení proudění podzemní vody **v tranzientní formě** bylo simulováno období sedmi let (1.10.1998 až 31.12.2005) v měsíčním časovém kroku.

Odporové parametry modelového řešení jsou převzaty ze stacionární simulace proudění podzemní vody, kapacitní parametry simulace byly doladěny při kalibraci modelové simulace. Přítok a odtok přes hranice lokálního modelového území je převzat z regionálního modelového řešení proudění podzemní vody a je simulován okrajovou podmínkou 2. druhu. Drenážní funkce toku Jizery resp. Labe je simulována stacionární okrajovou podmínkou třetího druhu. Srážková infiltrace v zájmovém území v celém simulovaném období odpovídá

průměrné srážkové infiltraci (nemění se v měsíčním kroku). Odběry podzemní vody ze sojovických jímacích řadů a studní s násoskovými řady R38 a R39 jsou simulovány pomocí drénů s hodnotami zadané hladiny podzemní vody a jednotnými odporovými parametry.

Velikost napouštění infiltračních van je do jednotlivých časových kroků zadávána pomocí okrajové podmínky 2. druhu a odpovídá měřeným údajům.

Měřené velikosti napouštění všech infiltračních nádrží a čerpání podzemní vody z objektů umělé infiltrace (l/s, měsíční sumy)



Simulováno je napouštění infiltračních van v rozsahu 0 l/s až 980 l/s (napouštění jednotlivých van je zadáno podle údajů z vodoměrů (u vybraných van), resp. je mezi vany rozloženo podle dopočtu ze sumární velikosti napouštění pro skupiny van a kolísání hladin podzemní vody v nejbližším okolí van).

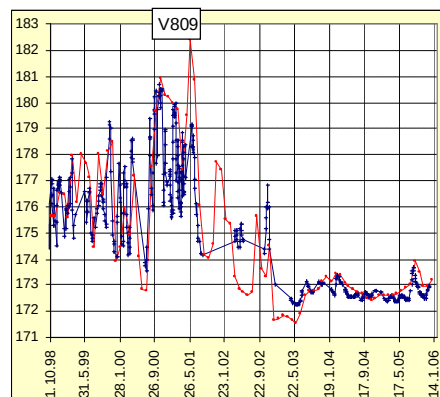
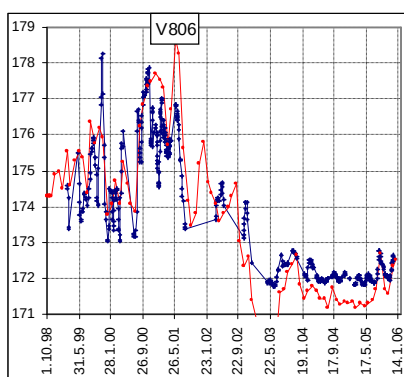
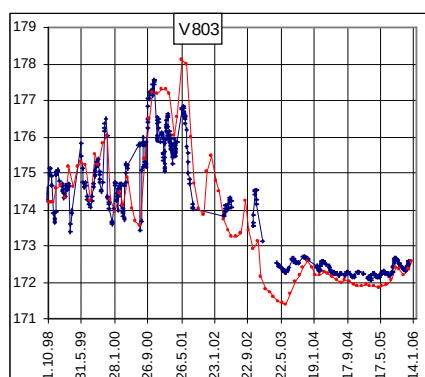
Výsledný sumární odběr z objektů komplexu umělé infiltrace se pohybuje v rozmezí 40 l/s až 780 l/s. Modelové čerpané množství je porovnáváno s měřenými údaji o odběrech vody z jednotlivých objektů evidovaných postupně od roku 2000.

Výstupy modelové simulace v transienční formě jsou údaje o vývoji:

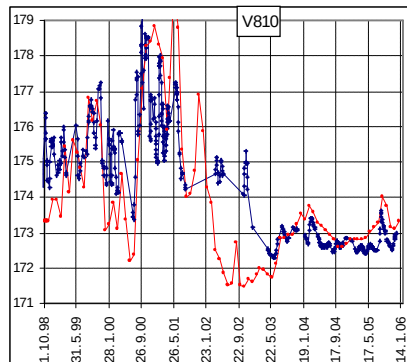
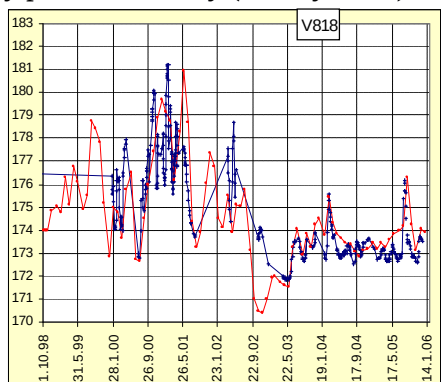
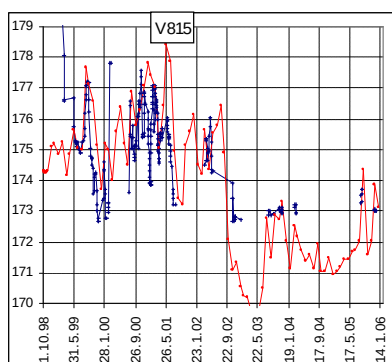
- hladin podzemní vody,
- drenáže podzemní vody do povrchových toků,
- odběrů podzemní vody a jejich rozložení mezi jednotlivé objekty.

Porovnání měřených a modelových hladin podzemní vody je dokumentováno na následujících grafech. Hladiny ve vybraných monitorovacích vrtech jsou řazeny v profilech cca kolmých na podélnou osu infiltračních van (žlutě je podbarven vrt v těsné blízkosti infiltrační vany), situace objektů je zobrazena na Obr. 1. Hladiny podzemní vody jsou vyneseny v m n.m., měřené hladiny jsou v grafech modře a modelové hladiny červeně.

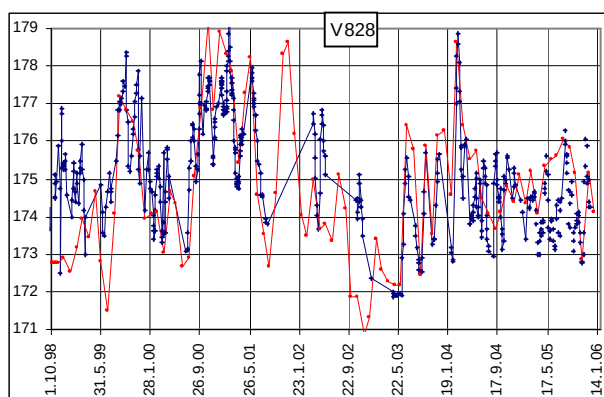
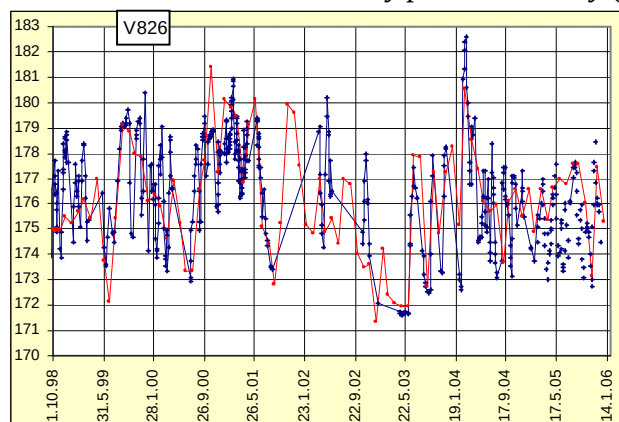
Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-1)



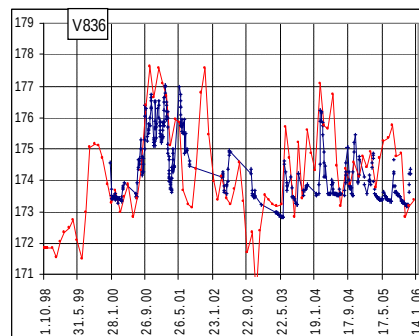
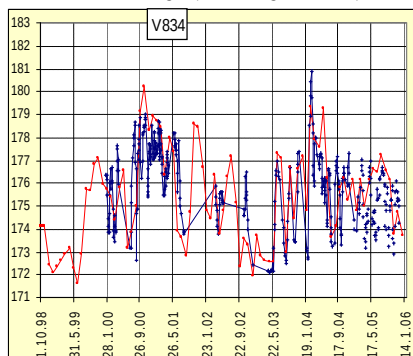
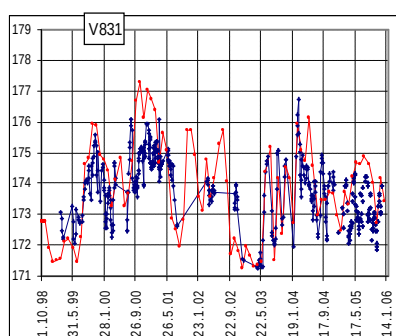
Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-2)



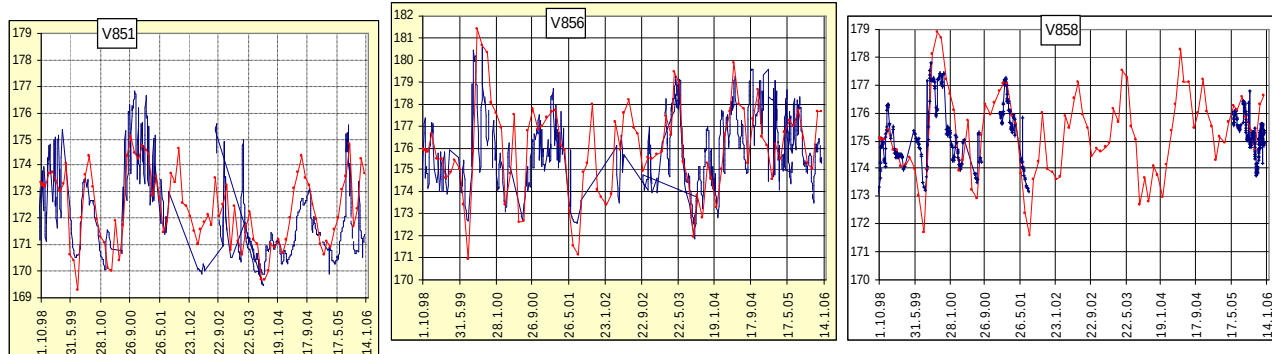
Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-3)



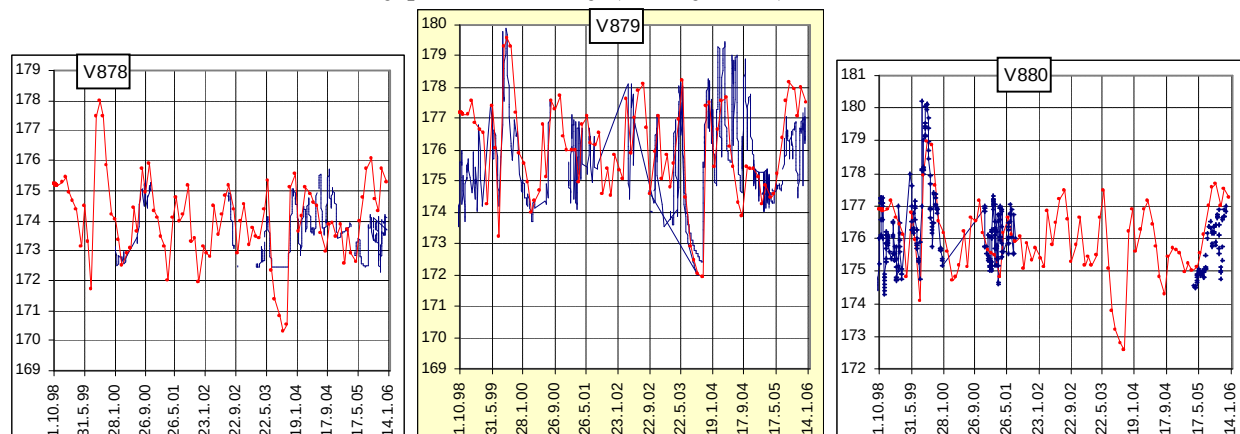
Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-4)



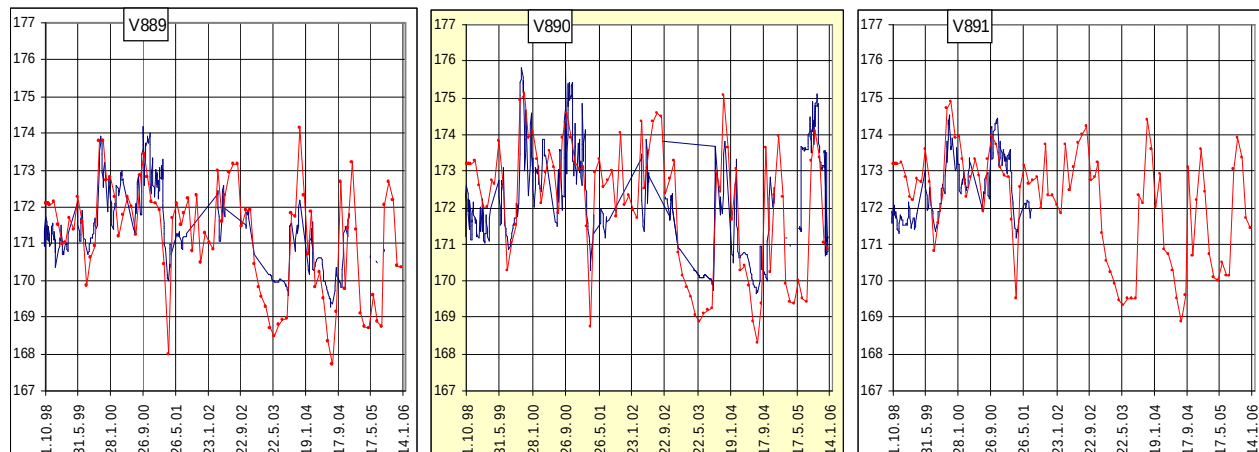
Měření a modelové hladiny podzemní vody (u van VN-12 a VN-6)



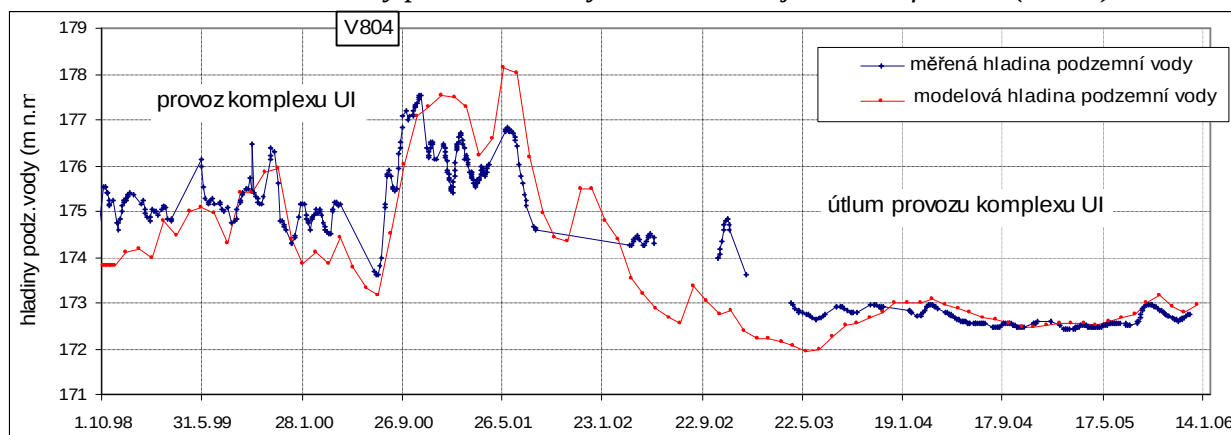
Měření a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-9)



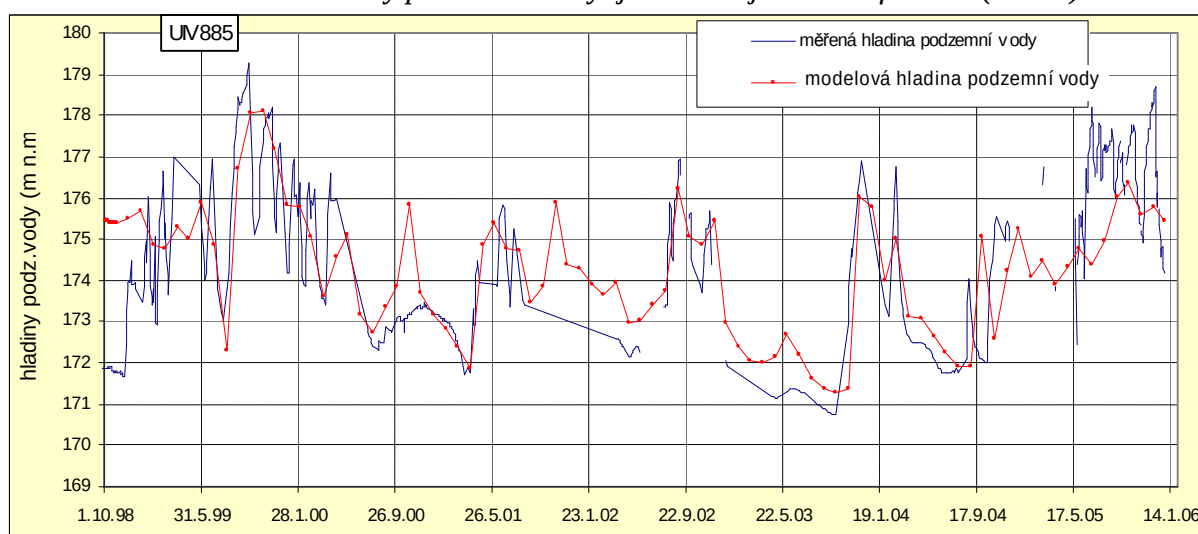
Měření a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-11)



Měřené a modelové hladiny podzemní vody- severní okraj umělé infiltrace (detail)



Měřené a modelové hladiny podzemní vody- jižní okraj umělé infiltrace (detail)



Porovnávání měřené a modelové hladiny podzemní vody hladiny vykazují velmi dobrou shodu a postihují veškeré trendy v časovém vývoji hladin podzemní vody ve sledovaném období postihnutebné v měsíčním časovém kroku. Menší nesrovnalosti v porovnávaných hladinách u několika objektů mohou souviset s časovou diskretizací tranzientní simulace (zadání napouštění resp. rozdělení čerpání v časových krocích).

5.5. Interpretace výsledků - závěrečné zhodnocení

Hlavním výsledkem modelových řešení proudění podzemní vody (pravidelné roční aktualizace) je hodnocení vývoje zásob a oběhu podzemní vody.

Jedním z požadovaných výsledků modelového řešení proudění podzemní vody byla **prognózní simulace útlumu provozu umělé infiltrace**. Základní požadavky na modelovou simulaci útlumu provozu umělé infiltrace byly:

- umožnit zahájení plného provozu komplexu umělé infiltrace,
- zamezit průniku případného znečištění k prostoru komplexu umělé infiltrace prouděním podzemní vody od skládky v Sojovicích a ze zázemí umělé infiltrace,
- zamezit vzdouvání podzemní vody pod skládkovým tělesem a vymývání prostoru skládky vlivem napouštění infiltračních van,
- minimalizovat „ztráty“ infiltrované vody (odtok podzemní vody mimo jímací objekty).

V režimu stacionárního i tranzientního proudění podzemní vody při průměrné srážkové infiltraci a průměrných úrovních hladiny vody v Jizeře byl simulován útlum provozu umělé infiltrace na 400 l/s. Útlum provozu byl simulován ve více variantách, odlišujících se rozložením napouštění infiltračních van a čerpáním podzemní vody. Po zhodnocení výsledků byla doporučena varianta optimálního provozu komplexu umělé infiltrace v Káraném při dodržení základních požadavků provozovatele. Z původně 15ti provozovaných infiltračních van bylo při variantě útlumu komplexu navrženo k využití pouze 8 van (při stanovení napouštěným množstvím). Výsledkem simulace byla i optimalizace čerpání z jímacích objektů a stanovení doby dotoku vody z infiltračních nádrží k jímacím vrtům.

6. Závěr

V předkládaném textu je popsána metodika zpracování modelového řešení. Metodický postup je rozdělen do několika na sebe navazujících okruhů. Modelové řešení oblastí s umělou infiltrací vyžaduje téměř shodné metody postupu jako modelové řešení v oblastech bez umělé infiltrace. Určitá specifika řešení oblastí s umělou infiltrací jsou popsána v kapitole 3. Součástí předkládané metodiky je detailní popis prací souvisejících především se zadáním, kalibrací a interpretací výsledků modelových řešení proudění podzemní vody a prezentací výsledků.

V samostatné kapitole je zdokumentována ukázka modelového řešení na lokalitě Káraný, která slouží jako vzorová lokalita (jediná na území ČR) pro zpracování modelu s umělou infiltrací pro účely zpětného hodnocení vývoje hladin a zásob podzemní vody. Na ukázce z lokality Káraný je demonstrován celý metodický postup realizace modelové simulace umělé infiltrace.

Zpracování modelových řešení proudění podzemní vody doporučujeme pro všechny lokality umělou infiltrací.

V Roztokách u Prahy, 20.9.2010

*RNDr. Martin Milický
Ing. Jan Uhlík, Ph.D.*

Seznam obrázků za textem:

- Obr. 1 Základní situace - oblast komplexu umělé infiltrace
- Obr. 2 Hladiny a směry proudění podzemní vody – modelové řešení – při průměrném provozu komplexu UI
- Obr. 3 Hladiny a směry proudění podzemní vody – modelové řešení – při provozu komplexu UI na úrovni 900 l/s
- Obr. 4 Hladiny a směry proudění podzemní vody – modelové řešení – při provozu komplexu UI na úrovni 420 l/s
- Obr. 5 Hladiny a směry proudění podzemní vody – modelové řešení – při provozu komplexu UI na úrovni 420 l/s

Seznam tabulek a obrázků v textu:

- Průměrné napouštění infiltračních nádrží a čerpání studní v komplexu umělé infiltrace
- Situace komplexu umělé infiltrace
- Báze kvartérních sedimentů (m n.m.) v prostoru komplexu umělé infiltrace
- Modelová síť a okrajové podmínky
- Celková bilance modelového řešení (l/s)
- Výsledné modelové přítoky k jímacím objektům
- Grafické porovnání měřených a modelových hladin podzemní vody v pozorovacích vrtech komplexu umělé infiltrace
- Tabulka porovnání měřených a modelových hladin v pozorovacích vrtech komplexu UI
- Modelové doby dotoku v prostoru infiltračních nádrží VN-1 až VN-4 a VN15 (při dlouhodobě průměrném napouštění infiltračních van – cca 690 l/s)
- Měřené velikosti napouštění všech infiltračních nádrží a čerpání podzemní vody z objektů umělé infiltrace (l/s, měsíční sumy)
- Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-1)
- Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-2)
- Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-3)
- Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-4)
- Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u van VN-12 a VN-6)
- Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-9)
- Měřené a modelové hladiny podzemní vody (u vany VN-11)
- Měřené a modelové hladiny podzemní vody – severní okraj umělé infiltrace
- Měřené a modelové hladiny podzemní vody - jižní okraj umělé infiltrace