

Transporta Chrudim – nový závod

**Modelové řešení proudění podzemních vod
a transportu chlorovaných uhlovodíků**

Aktualizace za rok 2016

Obsah

1	Úvod.....	4
2	Geologické a hydrogeologické poměry.....	5
3	Geometrie modelových oblastí a vstupní data	5
3.1	Geometrie modelových oblastí.....	5
3.1.1	Vývoj tlakové úrovně křídových kolektorů z hlediska zranitelnosti podzemní vody ..	5
3.1.2	Rozsah modelového řešení.....	6
3.2	Vstupní data.....	7
3.2.1	Hydraulická část.....	7
3.2.2	Transportní část.....	8
4	Kalibrace modelu	8
5	Výsledky modelového řešení	10
5.1	Hydraulická část.....	10
5.1.1	Nestacionární simulace ovlivněného proudění podzemní vody.....	10
5.1.2	Vývoj výšky hladin podzemní vody.....	11
5.2	Transportní část.....	11
5.2.1	Aktuální rozsah kontaminace PCE.....	11
5.2.2	Prognózní simulace vývoje transportu PCE.....	12
5.2.2.1	Prognózní simulace transportu PCE v modelové oblasti	12
5.2.2.2	Prognózní vývoj v oblasti hydraulické bariéry	12
5.2.3	Bilance PCE na lokalitě.....	13
5.2.3.1	Aktuální a výhledová bilance hmoty PCE v saturované zóně	13
6	Omezení a nejistoty modelového řešení.....	14
7	Závěry a doporučení.....	14

Přílohy

- Příloha č. 1 Situace zájmové oblasti
- Příloha č. 2 Rozsah modelové oblasti
- Příloha č. 3 Situace zájmových hydrogeologických a hydrologických objektů
- Příloha č. 4 Modelovací síť a okrajové podmínky matematického modelu
- Příloha č. 5 Model terénu modelového území
- Příloha č. 6.1 Modelové hladiny podzemní vody - nestacionární simulace při ovlivněném stavu na úrovni II. čtvrtletí (duben – červen) 2016
- Příloha č. 6.2 Modelové hladiny podzemní vody - nestacionární simulace při ovlivněném stavu na úrovni května 2015 – oblast nového závodu
- Příloha č. 7.1 Modelový rozsah kontaminace PCE – rok 2016
- Příloha č. 7.2 Prognózní simulace rozsahu kontaminace PCE po odstranění zdrojů kontaminace a po odstavení hydraulické bariéry – rok 2017
- Příloha č. 7.3 Prognózní simulace rozsahu kontaminace PCE po odstranění zdrojů kontaminace a po odstavení hydraulické bariéry – rok 2020
- Příloha č. 7.4 Prognózní simulace rozsahu kontaminace PCE po odstranění zdrojů kontaminace a po odstavení hydraulické bariéry – rok 2026
- Příloha č. 7.5 Modelový rozsah kontaminace PCE v oblasti nového závodu – rok 2016
- Příloha č. 7.6 Modelový rozsah kontaminace PCE v oblasti nového závodu – simulace rok 2017
- Příloha č. 7.7 Modelový rozsah kontaminace PCE v oblasti nového závodu – simulace rok 2020
- Příloha č. 7.8 Modelový rozsah kontaminace PCE v oblasti nového závodu – simulace rok 2026
- Příloha č. 8.1 Vývoj úrovně hladin v oblasti nového závodu – západ
- Příloha č. 8.2 Vývoj úrovně hladin v oblasti nového závodu – sever
- Příloha č. 8.3 Vývoj úrovně hladin v oblasti nového závodu – východ
- Příloha č. 8.4 Vývoj úrovně hladin v oblasti nového závodu – ostatní
- Příloha č. 8.5 Vývoj úrovně hladin v oblasti předpolí, Medlešic a Dřenic
- Příloha č. 9.1 Vývoj koncentrace PCE v oblasti hydraulické bariéry
- Příloha č. 9.2 Vývoj koncentrace PCE v oblasti elektrodílen, kovárny a hydraulické bariéry
- Příloha č. 9.3 Vývoj koncentrace PCE v oblasti Medlešic a Dřenic
- Příloha č. 9.4 Vývoj koncentrace PCE v oblasti předpolí hydraulické bariéry
- Příloha č. 10.1 Prognóza vývoje koncentrací pro vybrané objekty v oblasti hydraulické bariéry – západ
- Příloha č. 10.2 Prognóza vývoje koncentrací pro vybrané objekty v oblasti hydraulické bariéry – východ
- Příloha č. 10.3 Prognóza vývoje koncentrací pro vybrané objekty v oblasti hydraulické bariéry – sever
- Příloha č. 11 Základní informace o zájmových objektech
- Příloha č. 12 Porovnání měřených a modelových hladin
- Příloha č. 13 Porovnání měřených a modelových koncentrací PCE

1. Úvod

Předkládaná zpráva shrnuje výsledky aktualizace modelového řešení proudění podzemní vody a transportu perchlorethylenu za rok 2015. Modelové řešení bere v úvahu širší okolí bývalého podniku TRANSPORTA Chrudim, n.p.

Situace zájmového území je uvedena v příloze č. 1.

První část modelového řešení se zabývá kalibrací hydraulických charakteristik zvodnělého kolektoru, druhá část popisuje transport perchlorethylenu (PCE) v podzemní vodě.

Modelové řešení bylo realizováno v programu Visual MODFLOW Professional, verze 2011.1, od firmy Schlumberger Canada Ltd., Waterloo Hydrogeologic Division, Kanada. Program umožňuje 3D modelování, tzn. že je možné zohlednit prostorovou variabilitu hydrogeologických parametrů. Numerické řešení řídicí rovnice je založeno na metodě sítí s uzly umístěnými do středů bloků ortogonální sítě. Transport chemických látek v horninovém prostředí je řešen pomocí 3D advekčně-disperzních rovnic a chemických reakcí v programu MT3D99, který je součástí programového setu.

Aktuální verze odráží provedený sanační zásah v ohniscích znečištění a soustředí se na krátkodobý výhled vývoje kontaminace.

Cíle modelového řešení:

1. Hydraulická část:

- nestacionární simulace proudění podzemní vody,
- nestacionární simulace ovlivněného proudění podzemní vody na zájmové lokalitě; varianta je podkladem pro prognózní simulaci transportu PCE na lokalitě.

2. Transportní část:

- aktuální rozsah znečištění podzemních vod PCE v zájmovém území,
- bilance PCE v saturované zóně horninového prostředí,
- v rámci prognózní simulace transportu za rok 2016 bylo uvažováno pouze jedno řešení - stávající stav s odstávkou hydraulické bariéry na konci sanace v simulaci do horizontu 10 let,
- analýza výsledků simulace vzhledem ke stávající hydraulické bariéře.

Jako výchozí podklady pro zpracování modelového řešení byly využity:

- výsledky analýz podzemní vody z pravidelného monitoringu,
- zaměření hladin z pravidelného monitoringu,
- modelové řešení společnosti PROGEO, s.r.o. z let 2004–2009,
- modelové řešení Vodních zdrojů Ekomonitor, spol. s r.o. za roky 2010–2015,
- výsledky provedených geofyzikálních měření na lokalitě,
- výsledky hydrometrování na vybraných tocích,
- výsledky hydrodynamických zkoušek,
- výsledky laboratorních analýz z období 2003–2016.

2. Geologické a hydrogeologické poměry

Z geologického hlediska spadá zájmové území do jižního okraje české křídové pánve, která je v této oblasti zastoupena stratigrafickými jednotkami cenoman (perucko-korycanské souvrství) až střední turon (jizerské souvrství). V severní části modelové oblasti nasedá na jizerské souvrství horniny svrchního turonu až coniacu. Perucko-korycanské souvrství je tvořeno písčitými až vápnitými sedimenty, přičemž nadložní sedimenty turonu jsou tvořeny slínovitými horninami. Mocnost křídových sedimentů přesahuje 130 m, v případě slínovců a vápenitých jílovců jejich mocnost dosahuje minimálně 70 m. Svrchní část horninového prostředí tvoří kvartérní sedimenty, reprezentované sprašemi o mocnostech i přes 10 m. V zájmové oblasti se také lokálně vyskytují deluviofluviální a fluviální sedimenty o mocnosti až 15 m, nižší mocnosti těchto uloženin se vyskytují podél vodotečí. Modelové území je výrazně ovlivněno přítomností chrudimského zlomového pásma, které probíhá lokalitou ve směru JJV–SSZ.

Zájmové území spadá do hydrogeologického rajonu 4310 – Chrudimská křída [10, 11]. V křídových sedimentech je vodohospodářsky významný pouze kolektor A, tj. podzemní voda vázaná na bazální křídový kolektor perucko-korycanského souvrství. Převážně písčité kolektor vykazuje průlinovo-puklinovou propustnost. Infiltrační oblast těchto vod je na výchozech cenomanu na okraji křídové pánve, při okraji Železných hor. Kolektor A v oblasti vykazuje pozitivní tlakové poměry, kdy piezometrická výška přesahuje úroveň kontaminovaného kolektoru, jak je tomu např. u hydrogeologického objektu ART-1. K drenáži podzemních vod kolektoru A dochází přes tektonické pukliny do turonu a dále přes kvartérní sedimenty do místních vodotečí. Tyto výrony se ve vyšší míře uskutečňují v oblasti zlomového pásma. Slínovce a jílovce spodního až středního turonu představují regionální izolátor, který je však místy značně tektonicky porušen. Ve svrchní části sedimentů turonu se nachází zóna rozvolnění sedimentů pelitického charakteru, na níž je vázán zájmový ohrožený kolektor. Tato zóna zvodnění je místy izolována při stropu křídových sedimentů eluviem jílovitého charakteru, avšak právě místa (nový závod), kde tato těsnící vrstva není v dostatečné mocnosti, jsou výrazně ohrožena proniknutím kontaminace do turonské zvodně. Kvartérní spraše nejsou z hydrogeologického hlediska významné. Naopak významné jsou deluviofluviální a fluviální sedimenty, které se nacházejí mezi novým závodem a Medlešicemi, a dosahují mocnosti až 15 m. Významné zvodnění v kvartérních sedimentech se také vyskytuje podél větších vodotečí a ve štěrkopískových akumulacích, zejména terase Chrudimky.

3. Geometrie modelových oblastí a vstupní data

3.1 Geometrie modelových oblastí

3.1.1 Vývoj tlakové úrovně křídových kolektorů z hlediska zranitelnosti podzemní vody

Z hlediska ohrožení kontaminace podzemní vody chlorovanými uhlovodíky z areálu bývalého podniku Transporta připadá v úvahu pouze svrchní kolektor vázaný na zónu rozvolněných křídových sedimentů a bazální části kvartérního pokryvu.

Potenciálně ohrožený bazální kolektor (A - cenoman) v dlouhodobém sledování jednak nevykazuje stopy kontaminace, navíc však tlakové poměry ukazují na vyšší výtlačnou úroveň cenomanské zvodně nad úroveň turonské/kvartérní. Tato skutečnost je dokumentována vrtem ART-1, který se nachází v areálu Transporty a který jímá cenomanský kolektor ve srovnání s okolními režimně sledovanými hydrogeologickými objekty.

Objekt T-24 (turonský kolektor; havarijní stav od května 2013, kdy došlo v rámci sanačních prací ke zhroucení vrtu; poslední měřené hodnoty z dubna 2013) se nacházel cca 33 m od vrtu ART-1 (cenomanský kolektor).

V roce 2016 bude úroveň rozdílu tlakové úrovně cenomanského a turonského kolektoru hodnocena vrtu ART-1 a T-7, který se nachází 123 m jv. od vrtu ART-1. Za období duben až červen 2016 vykazoval kolektor cenomanu výtlačnou úroveň převyšující turonskou zvodně (T-7) průměrně o +4,00 m, přičemž

nejmenší rozdíl činil +3,5 m a největší +4,4 m. Vývoj rozdílů průměrných tlakových úrovní v těchto objektech za období 2004–2016 popisuje tabulka uvedená níže.

Tab. č. 1: Výtlačná úroveň podzemní vody z vrtu ART-1 (cenoman) nad T-7 (turon)

rok	počet měsíců měření v roce	výtlačná úroveň ART-1 nad objekt T-7 [m]
2004	10	+0,76
2005	10	+1,19
2006	12	+3,63
2007	12	+4,38
2008	12	+4,62
2009	5	+4,27
2010	4	+3,36
2011	9	+2,97
2012	10	+2,90
2013	12	+2,76
2014	10	+3,20
2015	12	+1,37
2016	12	+4,00

Celkově lze tlakové poměry cenomanu/turonu považovat za příznivé, tj. tlaková úroveň cenomanského kolektoru se dlouhodobě nachází nad úrovní turonského kolektoru a po privilegovaných cestách mezi kolektory dochází ke vzestupnému směru proudění podzemní vody. Z výše uvedené argumentace lze ohrožení bazálního kolektoru kontaminací CIU z areálu bývalého podniku Transporta pro stávající modelové řešení zanedbat. Ve vrtu ART-1 a ART-2 se občas vyskytne koncentrace PCE nad mezí detekce, která může být daná i netěsnicí výstrojí, nicméně dlouhodobě tyto vrty doporučuji sledovat.

3.1.2 Rozsah modelového řešení

Předkládaný matematický model je koncipovaný jako jednovrstevný. Na základě výsledků karotážních měření [7] byla určena úroveň 40 m pod terénem jako báze modelové vrstvy. Pod touto úrovní nebyl v turonu průzkumnými pracemi detekován významnější kolektor až po úroveň stropu cenomanu. Simulováno je zvodnění, vázané na sedimenty svrchního turonu a kvartéru. Tento kolektor je uvažován jako spojitý. Rozsah modelové oblasti je znázorněn v příloze č. 2.

Modelová oblast dosahuje rozlohy 33,5 km² a je vymezena třemi typy hranic: rozvodnice, vodoteč a uměle stanovená hranice. Hydrologické rozvodnice IV. řádu přitom pro předmětný kolektor uvažujeme za identické s rozvodnicemi hydrogeologickými. Příloha č. 4 zobrazuje rozdělení typu hranice v okrajových částech modelu. Západní hranici modelové oblasti tvoří hydrologická rozvodnice. Část jihozápadní části vymezení je tvořena umělou hranicí, část je tvořena úsekem toku Markovického potoka. Jižní sekci oblasti vymezuje rozvodnice a umělá hranice až po údolí Chrudimky. Následuje jihovýchodní úsek hranice, dlouhý cca 3,5 km, kde udává hranici modelu řeka Chrudimka. Východní úsek vymezení oblasti zasahuje cca 600 m severně nad Dražkovice a tento úsek je tvořen hydrologickou rozvodnicí IV. řádu. Uzavírající severní část je stanovena uměle.

Vrchní část modelové vrstvy byla konstruována z podkladu ZABAGED® (výškopis 3D vrstevnice, © ČÚZK Praha). Báze skalního podloží byla volena snížením terénu o 40 m. Model terénu je zobrazen v příloze č. 5.

Vstupními daty pro konstrukci modelového rozsahu byly údaje o hydrogeologických objektech v zájmovém prostoru, které uvádíme v příloze č. 11. Jejich situace je znázorněna v příloze č. 3.

Jako základní podklad pro celé modelové území byla použita rastrová mapa ČR 1 : 25 000 a pro areál nového závodu byla použita státní mapa měřítka 1 : 5 000 (vektorová katastrální složka, © ČÚZK Praha), která byla importována do modelu. Výřez zmiňovaných map zahrnuje oblast o velikosti 8 000 m ve směru osy X a 10 000 m ve směru osy Y s nulovou hodnotou ve spodním levém rohu modelové sítě. Modelová síť byla konstruována v souřadném systému S-JTSK s hodnotou nulového bodu $Y = 652\,800$ a $X = 1\,072\,400$. Modelové území bylo rozděleno ortogonální modelovou sítí se základní velikostí modelové buňky 50 x 50 m. V bezprostřední kontaminované oblasti byla modelová síť zahuštěna na velikost modelové buňky 12 x 12 m. Ve směru osy X tvoří modelovou síť 197 sloupců a ve směru osy Y 196 řad. Základní modelová síť vytváří celkem 38 612 modelových buněk. Modelovací síť je zobrazena v příloze 4.

3.2 Vstupní data

3.2.1 Hydraulická část

Jako základní vstupní modelová data byly zadány parametry uvedené níže.

- Koeficient hydraulické vodivosti (k) - pro modelové výpočty byly primárně zadány hodnoty koeficientů hydraulické vodivosti na základě výsledků hydrodynamických zkoušek, výsledků karotážního měření a geofyzikálního profilování a dále byly data upravovány dle odborného odhadu a znalostí širší zájmové oblasti; hodnoty v modelu se pohybují v rozsahu $8 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ až $8 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$. V oblastech tektonických poruch byly hodnoty k_y zadány ve stejné výši jako hodnoty k_x , a hodnoty k_z byly voleny na úrovni 1/2 hodnot k_x , jinde byly hodnoty k_z voleny ve výši 1/10 hodnot k_x .
- Hodnoty specifické storativity (S_s), koeficientu volné zásobnosti (S_y), celkové pórovitosti (n) a efektivní pórovitosti (n_e) byly zadány jednotně pro celé modelové území v hodnotách:

S_s	$1 \cdot 10^{-5} \text{ l.m}^{-1}$
S_y	0,15
n	0,20
n_e	0,15

- Hladiny podzemní vody – pro modelové výpočty bylo vycházeno z monitoringu hladin prováděných na lokalitě. Jako vstupní data modelového řešení byly použity průměrné hladiny za II. čtvrtletí (duben – červen) roku 2016. Situace modelových hydroizohyps je znázorněna v příloze č. 6. Data sloužila ke kalibraci hydraulické části modelového řešení. Úrovně HPV všech sledovaných objektů uvádíme v příloze č. 12.
- Okrajové podmínky (viz příloha č. 4):
 - ✓ Na odtoku podzemní vody z modelové oblasti je definována podmínka 1. typu (Dirichletova podmínka) na úrovni 222 m n.m.; tato podmínka je dále aplikována na části jihozápadní hranice na vstupu podzemních vod podél toku Bylanka – zde je určen konstantní přítok na úrovni 264–258 m n.m.,
 - ✓ Jihovýchodní hranici modelové oblasti tvoří okrajová podmínka 3. typu „řeka“. Hladina v Chrudimce byla zadána na úrovni 250–240 m n.m. se spádem od jihozápadu k severovýchodu. Šířka toku byla odhadnuta na 10 m, s hloubkou toku 0,30 m. Také část jihozápadní hranice je tvořena okrajovou podmínkou 3. typu – a to na vodoteči Markovický potok; od jihu (tj. po soutoku se Stolanským potokem) směrem k severu je daná úroveň 257–252 m n.m.,

- ✓ Na zbylých okrajových částech modelové oblasti je aplikována Neumannova okrajová podmínka nulového průtoku (2. typ okrajové podmínky),
- ✓ Na celé modelové území, vyjma zastavěných a zpevněných ploch (30 mm/rok), byla zadána hraniční podmínka typu infiltrace podílu srážek na úrovni 95 mm/rok.

3.2.2 Transportní část

V transportní části modelového řešení byl simulován transport chlorovaných uhlovodíků v ukazateli perchlorethylen (dále PCE), který tvoří majoritní sledovanou složku a současně se jedná o primární kontaminant (nejedná se o dceřiný produkt procesu dechlorace).

Jako podklad pro transportní simulaci byly zadány následující charakteristiky:

- objemová hmotnost suché horniny – $2\,100\text{ kg.m}^{-3}$
- disperze byla zadána v hodnotách:
 - ✓ *podélná disperzivita* a_L 10 m
 - ✓ *příčná disperzivita* a_T 0,1 a_L
 - ✓ *vertikální disperzivita* a_V 0,01 a_L
- adsorpce - při adsorpci látek je simulováno zachycení kontaminantu na povrchu organické hmoty v pevné fázi kolektoru, jehož množství je vyjadřováno jako váhová frakce organické hmoty f_{oc} . Tato hodnota byla odhadnuta na úrovni $4,5\text{ g.kg}^{-1}$. Pro potřeby modelování bylo nutné vypočítat adsorpční izotermu K_d [l.g^{-1}] dle vztahu:

$$K_d = K_{oc} * f_{oc}$$

kde K_{oc} je distribuční koeficient organický uhlík-voda. Hodnoty K_{oc} , f_{oc} a K_d použité pro modelové řešení jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Tab. č. 2: Hodnoty K_{oc} , f_{oc} a K_d pro PCE

Kontaminant	K_{oc} [l.kg^{-1}]*	f_{oc} [%]	K_d [l.kg^{-1}]
PCE	94,9	0,0045	0,47

* © Data THE RISK ASSESSMENT INFORMATION SYSTEM

- ireversibilní rozpad 1. řádu (biodegradace) – v rámci simulovaných rozkladných procesů byly použity hodnoty rozpadových konstant uvedené v následující tabulce č. 3.

Tab. č. 3: Hodnoty rozpadových konstant pro PCE (rozpad 1. řádu)

Kontaminant	rozpadová konstanta (den^{-1})*
PCE	$1,28 \cdot 10^{-4}$

* Data THE RISK ASSESSMENT INFORMATION SYSTEM

Simulace je laděna na období 10 let, s výstupy po 1, 5 a 10 letech.

4. Kalibrace modelu

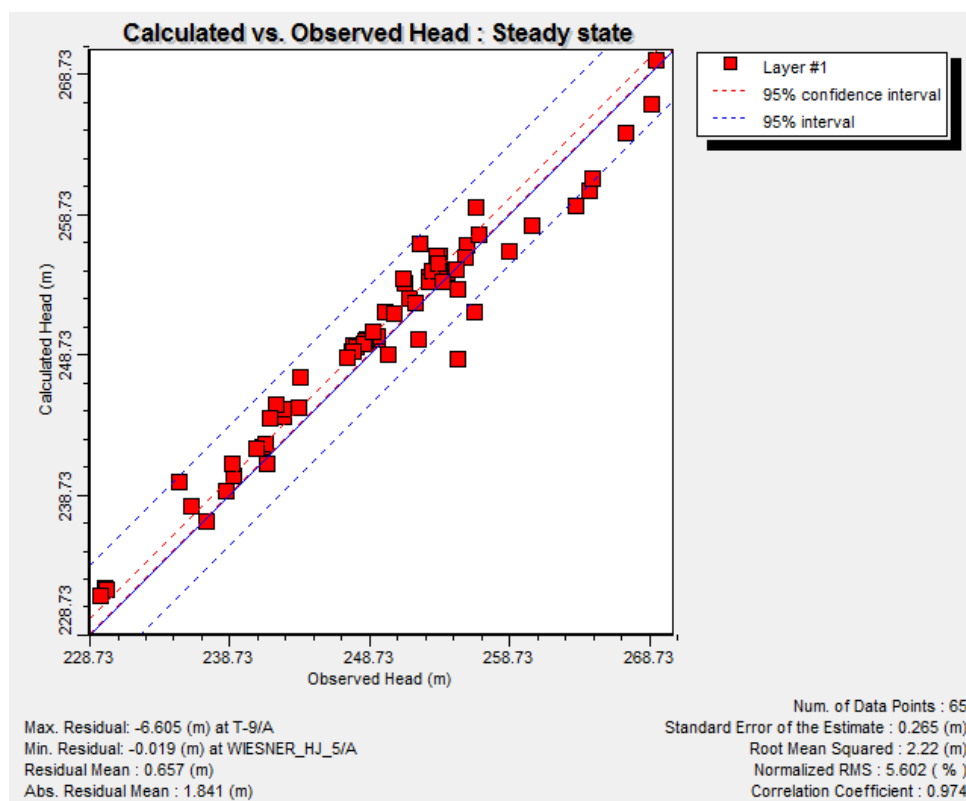
Při kalibraci modelu dochází k úpravě vstupních dat, zejména hydraulické vodivosti, množství infiltrace a okrajových podmínek tak, aby byly výsledky modelu v souladu s naměřenými daty v terénu. Z celkového počtu sledovaných objektů byly vyřazeny vrty, které reprezentují hlubší oběh podzemní vody - tj. spodní turon a cenoman.

Transporta Chrudim – nový závod
Modelové řešení proudění podzemních vod a transportu chlorovaných uhlovodíků na lokalitě,
model za rok 2016, únor 2017

Hladiny byly kalibrovány na stav proudění podzemních vod na lokalitě při sanačním čerpání za použití naměřených dat z II. čtvrtletí (duben – červen) roku 2016. Součástí kalibrace byla úprava podmínek na základě výsledků hydrometrování na profilech zájmových vodotečí.

Úspěšnost kalibrace byla hodnocena statistickými metodami a následně graficky znázorněna. Hodnocení kalibrace pro modelovou vrstvu zobrazuje graf č. 1. Statistické hodnocení po kalibraci modelu je uvedeno v tabulce č. 4.

Graf č. 1: Regresní analýza modelových/měřených hladin



Tab. č. 4: Statistická data hodnotící kalibraci modelu

Statistický ukazatel	Hodnota
Normalizovaná směrodatná odchylka N.R.M.S. [%]	5,60
Průměrná hodnota reziduí [m]	0,66
Absolutní průměr reziduí [m]	1,84
Korelační koeficient	0,97

Výsledek kalibrace lze hodnotit jako velmi přijatelný, a to vzhledem k nízké hodnotě N.R.M.S. modelové vrstvy (5,6 %) a korelačního koeficientu (0,97). Z průměrných hodnot reziduí je zřejmé, že kalibrované modelové hladiny leží u modelové zvodně v průměru o 0,66 m výše než hladiny měřené v terénu.

Nepřesnosti v rozdílech hladin jsou způsobeny nehomogenitou horninového prostředí, jež modelová simulace zohlední pouze na základě dostupných dat. Tyto odchylky se projevují na nepřesnosti modelové simulace.

5. Výsledky modelového řešení

5.1 Hydraulická část

5.1.1 Nestacionární simulace ovlivněného proudění podzemní vody

Simulace proudění podzemní vody byla provedena jako nestacionární, a to na úrovni hladin sledovaných objektů z minulých modelových řešení (2010–2015) a na úrovni hladin ze II. čtvrtletí (duben – červen) roku 2016. Tato simulace proudění podzemní vody byla sestavena pro účely kvantifikace transportu perchlorethylenu v podzemní vodě. Výsledek nestacionárního proudění podzemní vody je znázorněn v mapě hydroizohyps v příloze č. 6.1 a 6.2. Modelová zvoď zjednodušeně simuluje pohyb podzemní vody ve spojitém kolektoru kvartérních sedimentů a svrchní rozpukané zóny podložních slínovců.

Tab. č. 5: Průměrná čerpaná množství za rok 2016

Objekt	Čerpání v l/s
TJ-1	0,14
TJ-2	0,35
TJ-3	0,68
TJ-4	0,09
TJ-5	0,13
TJ-6	0,07
TJ-7	0,05
TJ-10	0,16
TJ-11	0,04
TJ-12	0,06
TJ-13	0,11
T-28	0,02
T-29	0,07
T-35	0,02
Celkem	1,99

Dotace podzemní vody do modelové oblasti je simulována zejména z atmosférických srážek, dále je významná dotace z vodotečí. Třetí součást sumární dotace tvoří Dirichletova okrajová podmínka na jihozápadě modelové oblasti. Na odtoku podzemní vody z oblasti se v největší míře podílí drenáž podzemní vody do povrchových toků, významná je dále Dirichletova podmínka konstantní hladiny definovaná na severu oblasti. V modelu byly uvažovány odběry podzemní vody ze sanačních objektů řady TJ s výjimkou hydrogeologických vrtů TJ-8 a TJ-9, které vzhledem ke své konstrukci (reprezentují spodní turon) nespadají do modelové vrstvy. Čerpaná množství (viz tabulka č. 5) byla uvažována na úrovni průměrných intenzit čerpání z jednotlivých objektů za rok 2016.

Obecný směr neovlivněného proudění podzemních vod (simulace byla provedena pro neovlivněný stav před započítáním sanačního čerpání v roce 2004) v modelové oblasti je podle předchozích řešení matematických modelů [1–5] směrem k SSZ. Jihozápadní část modelové oblasti je drénována řekou Chrudimkou, a toto území vykazuje proudění podzemní vody směrem k JV–V. V oblasti předmětného území areálu nového závodu je proudění směrem k SSV–S. Obecný směr proudění podzemní vody je v předkládaném řešení identický s neovlivněným stavem. Ovlivněný stav z roku 2016, podobně jako předchozí modelové řešení za období 2010–2015, ukazuje na změnu proudového pole v oblasti nového závodu směrem k SV, resp. k oblasti sanačních vrtů řady TJ.

Nadmořské výšky hladiny podzemní vody v simulaci pro II. čtvrtletí (duben - červen) roku 2016 dosahují nadmořské výšky v intervalu 229–270 m n.m. Kvantifikovanou bilanci vstupů a výstupů pro modelovou oblast popisuje tabulka č. 6.

Tab. č. 6: *Bilance vstupů a výstupů vody v modelové oblasti – nestacionární ovlivněné proudění*

VSTUPY	m³.den⁻¹	l.s⁻¹
infiltrace z atmosférických srážek	5 512	63,8
dotace z vodotečí	2 779	32,0
přítok do modelové oblasti	90	1,0
Celkem	8381	97
VÝSTUPY	m³.den⁻¹	l.s⁻¹
dotace do vodotečí	7 355	85,1
odtok přes severní hranici	886	10,3
odběry sanačních vrtů	143	1,66
Celkem	8 384	97,0
ROZDÍL VSTUPŮ A VÝSTUPŮ	m³.den⁻¹	l.s⁻¹
Celkem	-3	-0,035

5.1.2 Vývoj výšky hladin podzemní vody

Celkový průměrný úhrn srážek za rok 2016 pro Pardubický kraj byl s hodnotou 540 mm (ČHMÚ) podprůměrný (dlouhodobý srážkový normál je pro Pardubický kraj 711 mm). Z celého roku 2016 byly srážkově nadprůměrné pouze měsíce leden, březen, srpen a listopad. Ostatní měsíce roku byly srážkově na 25 – 75 % průměrných hodnot.

V průběhu období II. čtvrtletí (duben – červen) roku 2016 vykazovala podzemní voda cenomanu (ART-1) tlakovou úroveň o +4 m vyšší než v objektu T-7. Vzhledem k fluktuaci tlakových poměrů podzemní vody v kolektorech turonu a cenomanu doporučujeme i nadále provádět pravidelný monitoring podzemní vody obou kolektorů.

Úroveň hladiny podzemní vody v pozorovacích objektech v oblasti hydraulické bariéry v roce 2016 vykazovala podobnou úroveň jako v předešlém období. V kontrastu k bilančně výraznému roku 2010 lze konstatovat, že úroveň hladiny podzemní vody turonského kolektoru je ustálená.

Úrovně hladiny podzemní vody v roce 2016, pozorované na hydrogeologických objektech v oblasti Medlešic a Dřenic, ukazují na relativně vyrovnaný stav hladiny podzemní vody s minimálními fluktuacemi.

5.2 Transportní část

5.2.1 Aktuální rozsah kontaminace PCE

Rozsah kontaminace PCE za roku 2016 je uveden v příloze č. 7.1, příloha č. 13 reprezentuje srovnání měřených (vstupních) a modelových koncentrací v jednotlivých objektech. Maximální koncentrace i nadále přetrvávají v saturované zóně v oblasti stávající hydraulické bariéry (sanační vrtů řady TJ a některých vrtů řady T) a v ohniscích kontaminace (korea, kalírna a elektrodílny). Maximální hodnoty byly monitoringem za rok 2016 zastiženy v oblasti vrtu TJ-1 s průměry koncentrací cca 100 – 116 µg/l PCE (únor – květen). Ve druhé polovině roku 2016 již klesly pod hranici 10 µg/l. Jedná se o příznivý pokles maxim koncentrací, které ještě v roce 2015 převyšovaly izolinie 40 µg/l PCE.

Příznivý stav vývoje znečištění můžeme též přisuzovat provedené sanaci nesaturované zóny v předchozím období.

V oblasti Medlešic a Dřenic se koncentrace PCE pohybují v jednotkách a maximálně prvních desítkách $\mu\text{g.l}^{-1}$.

V transportní části modelového řešení byl uvažován transport chlorovaných uhlovodíků v ukazateli PCE. Aktuální rozsah kontaminace saturované zóny byl sestaven na základě monitoringu podzemních vod na lokalitě. Jako vstupní hodnoty PCE byly uvažovány koncentrace za rok 2016, tj. byly uvažovány průměry měřených hodnot.

5.2.2 Prognózní simulace vývoje transportu PCE

5.2.2.1 Prognózní simulace transportu PCE v modelové oblasti

Jako výchozí stav pro prognózní simulace je uvažován aktuální ovlivněný stav znečištění uvedený v kapitole 5.2.1 a znázorněný v grafické podobě v příloze č. 7.1. Simulace byla laděna na **období 10 let**, s výstupy po 1, 5 a 10 letech. Plošné rozsahy prognózního vývoje kontaminace PCE jsou uvedeny v přílohách č. 7.2–7.4 pro celou modelovou oblast, detailní situace v oblasti nového závodu je prezentována v přílohách 7.5–7.8. Grafické znázornění budoucího vývoje koncentrací PCE ve vybraných objektech obsahuje příloha č. 10.

Jako v předchozím modelovém řešení z roku 2015, je aktuálním cílem soustředit se na simulaci vývoje koncentrací v této oblasti z hlediska návrhu změny režimu provozu hydraulické bariéry.

Z hlediska dlouhodobého výhledu bude dále docházet k rozpouštění zbytkových chlorovaných uhlovodíků. Zdroje kontaminace v nesaturované zóně byly v letech 2013 – 2014 odstraněny a sanovány. Nyní dochází k pozvolnému poklesu zbytkového znečištění, obsaženého v saturované zóně.

Z příloh č. 7.5–7.8 je v horizontu 10 let za provozu hydraulické bariéry redukce PCE v saturované zóně velice patrná. Nejvíce jsou redukovány plochy s vyššími relativními hodnotami kontaminantu v podzemní vodě (vrty nejbližší ohnisku). Zatímco v roce 2016 plocha přesahující $5 \mu\text{g/l}$ PCE dosahovala $173\,251 \text{ m}^2$ a plocha přes $20 \mu\text{g/l}$ PCE 1478 m^2 , v roce 2016 došlo k příznivému poklesu koncentrací pod hranici $30 \mu\text{g/l}$ PCE. Jedná se o výraznější zlepšení stavu, nežli bylo prognózováno v minulém modelovém zpracování. V kontaminované oblasti s nižšími koncentracemi pod $10 \mu\text{g/l}$ PCE dochází k redukci znečištění již jen pozvolně.

Severní část kontaminačního mraku není výrazně ovlivněna čerpáním na hydraulické bariéře a v rámci simulace dochází k redukci rozsahu, výrazným jevem je zmenšování ploch s hodnotou přesahující $5 \mu\text{g/l}$ a v horizontu 10 let i po odstavení provozu hydraulické bariéry v severní části nového závodu, dochází k "odtržení" kontaminované vody s hodnotou nad $1 \mu\text{g/l}$ v oblasti vrtu T-31. V horizontu 10 let dokonce dochází k zastavení postupu této kontaminace v severní části a rozsah je redukován i směrem k jihu.

5.2.2.2 Prognózní vývoj v oblasti hydraulické bariéry

Z hlediska efektivity hydraulické bariéry byla provedena revize výpočtů, kdy dojde ke změně trendu simulovaných koncentrací, jak bylo provedeno v předchozím modelovém vypracování. Byly použity stejné objekty situované v oblasti centra kontaminačního mraku, resp. v severní části areálu nového závodu. Na těchto objektech byla provedena analýza efektivity snižování kontaminace PCE v proudící podzemní vodě v rámci simulace na 10 let. Krok simulace byl 20 dní.

Jako reprezentativní objekty pro prezentaci výsledků analýzy byly vybrány vrty TJ-11, TJ-12 a T-29. Následující grafy znázorňují efektivitu poklesu koncentrací PCE v podzemní vodě v závislosti na úrovni koncentrace PCE v předchozím kroku. Hodnoty pro jednotlivé vrty byly vyneseny na základě výpočtu podle vzorce

$$E_f = \frac{(C_n - C_{n-1})}{(t_n - t_{n-1})}$$

kde

E_f – relativní změna v závislosti na sledované změně od předchozího kroku měření

C_n – simulovaná koncentrace v daném kroku ($\mu\text{g/l}$)

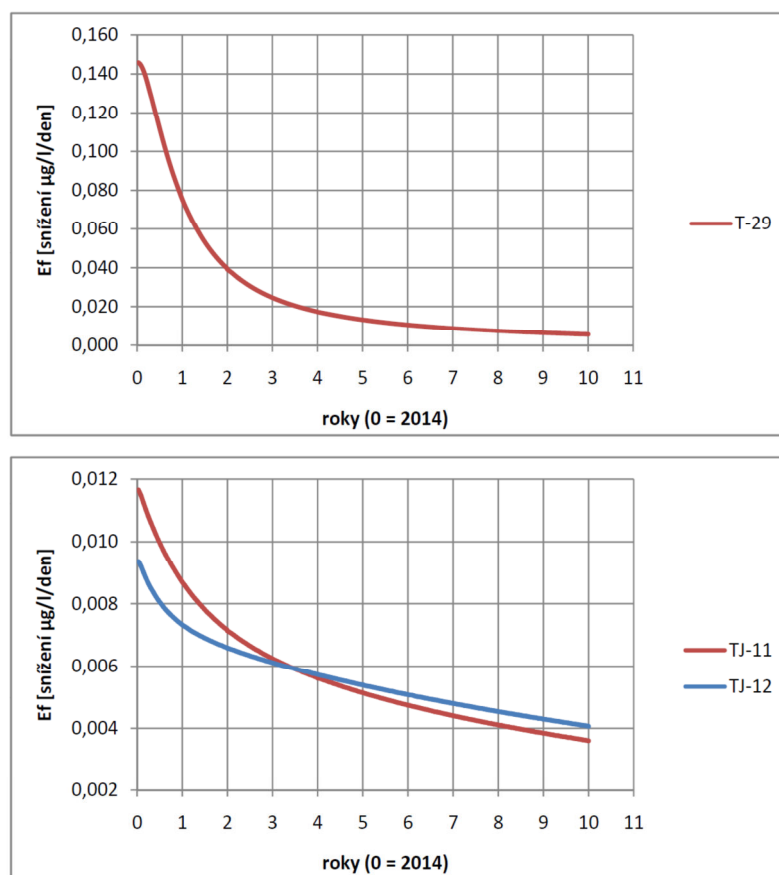
C_{n-1} – simulovaná koncentrace v předchozím kroku ($\mu\text{g/l}$)

t_n – čas daného kroku (dny)

t_{n-1} – čas předchozího kroku (dny)

Samotné hodnoty tedy reprezentují pokles kontaminace v podzemní vodě daného objektu v jednotkách $\mu\text{g/l/den}$.

Grafy č. 2–3: Efektivita poklesu koncentrace PCE v rámci simulace na vybraných vrtech



Z grafů je patrný obdobný vývoj, jaký byl sledován v minulosti. Rychlý pokles znečištění je patrný v počátcích simulace do 2 let od počátku. Poté je již pokles (efektivita) pozvolná, což souvisí s nízkými zbytkovými koncentracemi v kolektoru. Oproti minulému vypracování se jedná o roční pokles křivek.

5.2.3 Bilance PCE na lokalitě

5.2.3.1 Aktuální a výhledová bilance hmoty PCE v saturované zóně

Bilance aktuálního stavu PCE na lokalitě byla sestavena na podkladě modelových koncentrací v jednotlivých modelových buňkách a mocnosti zvodnění v daném místě. Rozložení modelového množství PCE pro k závěru roku 2016 je uvedeno v tabulce č. 7.

Tab. č. 7: Bilanční modelové množství PCE v zájmovém prostoru v závěru roku 2016

Ukazatel	množství PCE [kg]		
	PCE ve stavu sorpce	PCE rozpuštěné	celkem
PCE	421	59	480

Vzhledem k provedené sanaci nesaturované zóny v letech 2013/2014 již není předpoklad na dotaci CIU z nesaturované zóny. Výhled vývoje bilance PCE v saturované zóně v rozsahu let 2015–2025 poskytuje následující tabulka č. 8. Vývoj bilance perchlorethylenu v tuřonském kolektoru v časovém horizontu 10 let vykazuje téměř lineární pokles dle rovnice: $y = -21,7x + 536$ s hodnotou spolehlivosti $R^2 = 0,99$.

Tab. č. 8: Simulace bilance PCE z modelového řešení

roky	2016	2017	2020	2026
CELKEM [kg]	480	464	444	326
PCE - rozpouštěné [kg]	59	57	52	36
PCE - sorbované [kg]	421	407	392	290

6. Omezení a nejistoty modelového řešení

Ve vymezení kontaminačních mraků mohou nastat určité nepřesnosti z důvodu zjednodušení a schematizace horninového prostředí modelovou simulací, z důvodu existence do modelu nezahrnutých nebo nezjištěných dílčích preferenčních cest proudění a transferu kontaminantu. Hodnocení prognózy vývoje znečištění na lokalitě zatěžuje nejistota v definování množství a rozložení kontaminantu mimo strukturu zvodně, tj. zbytkového znečištění v nesaturované zóně a zbytkového znečištění v puklinách. Vzhledem k charakteru zvodnělého prostředí nelze stanovit přesnější data v bilanci podzemní vody a na vodu vázaného znečištění.

7. Závěry a doporučení

Hydraulická část

- Na základě dat z aktuálně realizovaných prací na lokalitě a na základě minulých modelových řešení byla vytvořena nestacionární simulace ovlivněného proudění. Simulace sloužila k odhadu hydraulických charakteristik zvodnělého kolektoru.
- V průběhu roku 2016 byla dokumentována obdobná hladina podzemní vody srovnatelná s předchozím rokem, s mírně poklesovým trendem, bez výrazných fluktuací.
- Tlaková bilance mezi cenomanem a tuřonem zůstává i nadále pozitivní – v období 2007–2009 přesahovala hodnota rozdílu tlakové úrovně mezi vrty ART-1 a T-24 přes hodnotu 11 m, v roce 2010 klesla tato hodnota pod 9 m; za období 2011–2013 lze konstatovat, že se hodnota udržuje na úrovni +9 m, což lze hodnotit jako uspokojivé; V roce 2013 byl vrt T-24 poškozen a pro hodnocení nahrazen vrtem T-7; Průměrná výtláčná úroveň cenomanského kolektoru byla v roce 2015 na úrovni +1,37 m nad tlakovou úrovní kolektor tuřonu (rok 2014 = 3,2 m).

Transporta Chrudim – nový závod

*Modelové řešení proudění podzemních vod a transportu chlorovaných uhlovodíků na lokalitě,
model za rok 2016, únor 2017*

- Doporučujeme zvážit možnost úpravy čerpání z hydraulické bariéry v horizontu 2 let.

Transportní část

- Modelové řešení za rok 2016 uvažuje kontaminaci perchlorethylenu jako prioritního a primárního kontaminantu na lokalitě Transporta; sanační limit v oblasti nového závodu byl pro podzemní vodu stanoven na úrovni 20 µg/l PCE.
- Byla provedena simulace šíření PCE pro roky 2017, 2020 a 2026.
- V rámci modelového řešení za rok 2016 byl simulován stávající systém hydraulické bariéry v provozu od ledna do prosince 2016.
- V rámci modelového řešení za rok 2017 - 2026 byl simulován vývoj po odstávce stávajícího systému hydraulické bariéry a to až do konce modelové simulace.
- Z výsledků modelového řešení lze konstatovat, že hodnoty kontaminace podzemní vody v oblasti nového závodu a severního předpolí v horizontu 10 let při odstavení čerpání výrazně poklesnou procesem přirozené atenuace. Pro rok 2026 bude na základě modelové simulace plocha se zbytkovou koncentrací dosahovat hodnot v rozmezí 1 - 15 µg/l pro PCE. V horizontu 10 let se dle simulace nebude v oblasti nového závodu vyskytovat podzemní voda přesahující 15 µg/l PCE.
- Celková bilance PCE v období 10 let simulace klesne o cca 35 % z hodnoty 480 kg na 326 kg. Aktuální modelové zpracování upřesnilo prognózovanou bilanci na nižší úrovni (vliv sanace nesaturované zóny v letech 2013 – 2014).
- Modelová simulace představuje oproti skutečnosti velice zjednodušené zvodnělé horninové prostředí; upozorňují, že se zájmová oblast nachází v historicky využívaném průmyslovém území, v kterém můžou fungovat preferenční cesty proudění pro transfer kontaminantu; modelové řešení využívá pro své výpočty schematizaci horninového prostředí, a proto se prognózy mohou od reálného vývoje poněkud lišit.

Doporučení

Vzhledem k nízkým hodnotám koncentrací PCE v prostoru ohniska a jeho okolí pod hranici 20 µg/l, doporučujeme provádět postsanační monitoring za účelem zjištění případně zvýšených hodnot koncentrací blížících se sanačním limitům.

Použitá literatura:

1. Uhlík J. et al., (2010), Modelové hodnocení transportu chlorovaných uhlovodíků z lokality bývalého s.p., Transporta Chrudim, MS. PROGEO s.r.o.
2. Uhlík J. et al., (2009), Modelové hodnocení transportu chlorovaných uhlovodíků z lokality bývalého s.p., Transporta Chrudim, MS. PROGEO s.r.o.
3. Uhlík J. et al., (2008), Modelové hodnocení transportu chlorovaných uhlovodíků z lokality bývalého s.p., Transporta Chrudim, MS. PROGEO s.r.o.
4. Uhlík J. et al., (2007), Modelové hodnocení transportu chlorovaných uhlovodíků z lokality bývalého s.p., Transporta Chrudim, MS. PROGEO s.r.o.
5. Uhlík J. et al., (2006), Modelové hodnocení transportu chlorovaných uhlovodíků z lokality bývalého s.p., Transporta Chrudim, MS. PROGEO s.r.o.
6. Unčovský, J. (2003): Analýza rizika a projektová dokumentace nezbytně nutných protihavarijních opatření na lokalitě bývalého s.p. Transporta Chrudim a okolí. - Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s r. o., 1 – 216. Chrudim.
7. Unčovský, J. (2009): Sanační práce na lokalitě Transporta Chrudim. Aktualizace analýzy rizika v roce 2009. - Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s r. o., 1 – 138. Chrudim.
8. Unčovský, J. (2012): Sanační práce na lokalitě Transporta Chrudim. Zpráva pro kontrolní den č. 25. - Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s r. o., 1 – 65. Chrudim.
9. Demek, J. (edit.) a kol. (1987): Zeměpisný lexikon ČSR. Hory a nížiny. Academia. Praha.
10. Herčík, F. - Herrmann, Z. - Valečka, J. (1999): Hydrogeologie české křídové pánve. ČGÚ. Praha.
11. Olmer, M. - Herrmann, Z. - Kadlecová, R. - Prchalová, H. et al. (2006): Hydrogeologická rajonizace České republiky. Sbor. geolog. věd, Hydrogeolog. inž. geolog., 23. ČGS. Praha.
12. Dobiáš, V. (2011): Transporta Chrudim - nový závod, modelové řešení proudění podzemních vod a transportu chlorovaných uhlovodíků za rok 2010. Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s r.o., Chrudim.
13. Dobiáš, V. (2012): Transporta Chrudim - nový závod, modelové řešení proudění podzemních vod a transportu chlorovaných uhlovodíků za rok 2011. Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s r.o., Chrudim.
14. Dobiáš, V. (2013): Transporta Chrudim - nový závod, modelové řešení proudění podzemních vod a transportu chlorovaných uhlovodíků za rok 2012. Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s r.o., Chrudim.
15. Dobiáš, V. (2014): Transporta Chrudim - nový závod, modelové řešení proudění podzemních vod a transportu chlorovaných uhlovodíků za rok 2013. Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s r.o., Chrudim.
16. Dobiáš, V. (2015): Transporta Chrudim - nový závod, modelové řešení proudění podzemních vod a transportu chlorovaných uhlovodíků za rok 2014. Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s r.o., Chrudim.
17. Borovský, O. (2016): Transporta Chrudim - nový závod, modelové řešení proudění podzemních vod a transportu chlorovaných uhlovodíků za rok 2015. Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s r.o., Chrudim.