



Teorie a praxe migračních zkoušek v ochraně životního prostředí

autoreferát doktorské disertační práce

PRAHA 2015

AUTOR: Pavel Šimek

Katedra geoenvironmentálních věd

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta životního
prostředí**

Fakulta životního prostředí

Katedra geoenvironmentálních věd

Teorie a praxe migračních zkoušek v ochraně životního prostředí

Theory and practice of tracer tests in environmental protection

Autoreferát disertační práce

Pavel Šimek

Praha 2015

Doktorská disertační práce „Teorie a praxe migračních zkoušek v ochraně životního prostředí“ byla vypracována v rámci doktorského studia na Katedře geoenvironmentálních věd Fakulty životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze.

Uchazeč: Ing. Pavel Šimek

Obor: Environmentální modelování

Školitel: doc. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Oponenti:

RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D. – Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky

Mgr. Václav Šípek, Ph.D. – Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i.

prof. Ing. Pavel Pech, CSc. – Fakulta životního prostředí, Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování, Česká zemědělská univerzita v Praze

Obhajoba disertační práce se koná dne 21. září 2015 v 14:00, v L 264 Fakulty životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze, Kamýcká 129, Praha 6 - Suchdol.

S disertační prací je možné se seznámit na Oddělení pro vědu a výzkum FŽP ČZU v Praze, Kamýcká 129, Praha 6 - Suchdol.

SOUHRN

Úspěšná predikce chování a šíření látek v podzemním prostředí je závislá na dostupnosti spolehlivých transportních parametrů. Pro predikci šíření látek v podzemní vodě jsou vhodná analytická řešení advekčně-disperzní rovnice. V disertační práci jsou popsána analytická řešení dostupná v literatuře popisující jednorozměrný transport v ustáleném hydrodynamickém poli. Tato řešení jsou použita pro vyhodnocení migračních zkoušek. Migrační zkoušky jsou všeobecně považovány za nejspolehlivější metodu pro získání parametrů hydrogeologického prostředí.

Součástí práce je uživatelsky orientovaný program Mipar 2.0, který slouží k vyhodnocování dat získaných z migračních zkoušek. Metody použité pro vyhodnocování dat jsou založeny na popsaných analytických řešeních. Program byl vytvořen v programu Microsoft Visual Studio Community 2013 v programovacím jazyku C#. Funkčnost programu byla ověřena na terénních datech a na datech z literatury. Program je použitelný pro rychlé vyhodnocení migračních zkoušek k určení parametrů zvodně. Slouží také k ověření kvality numerických modelů. V komplexních hydrologických systémech mohou být analytická řešení stále užitečná, protože poskytnou odhad rychlosti proudění podzemní vody, což umožní lépe navrhnout sběr dat a monitorování kvality podzemní vody.

V rámci práce byly uskutečněny migrační zkoušky na dvou terénních lokalitách a na dvou umělých mokřadech. Jako indikátory byly použity dvě soli (NaCl, KBr) a dvě fluorescenční barviva (Fluorescein, Rhodamin 6G). Získaná data byla vyhodnocena v programu Mipar 2.0.

Klíčová slova

stopovací zkoušky, migrační parametry, šíření znečištění, indikátor, interpretace dat

SUMMARY

Successful predictions of the fate and transport of solutes in the subsurface is based on the availability of accurate transport parameters. Analytical solutions to the advective-dispersive solute-transport equation are useful in predicting the fate of the solutes in ground water. Analytical solutions compiled from available literature are presented for one dimension solute transport in uniform ground water flow. These solutions are used for tracer test data interpretation. Tracer testing is generally regarded as the most reliable and efficient method of gathering subsurface hydrogeological information.

A user-oriented computer program Mipar 2.0 was created to estimate solute transport parameters from observed concentrations (the inverse problem) or for predicting solute concentrations (the direct problem) using the advection-dispersion equation as the transport model. The program usability was verified on field data and on data from literature. The computer program was created in Microsoft Visual Studio Community 2013 with C# language. Methods of calculation parameters are based on analytical solutions of advection-dispersion equation for given conditions. The program is used to quickly evaluate field tracer test data to determine the properties of the aquifer. Results can also be used to verify the quality of numerical models. In the complex hydrogeological systems, analytical solutions can be also useful because it can provide estimates of solute velocity, and thus allow better data collection and monitoring groundwater quality.

As a part of the doctoral thesis the tracer tests at a two field study sites and at a two constructed wetlands were performed. As a tracer two salts (NaCl, KBr) and two fluorescent dye (Fluorescein, Rhodamin 6G) were used. The obtained data were analysed in the formed computer program Mipar 2.0.

Keywords

tracer test, migration parameters, spread pollution, data interpretation

OBSAH

ÚVOD	6
CÍLE	7
VÝZNAM A MOŽNOSTI VYUŽITÍ MIGRAČNÍCH ZKOUŠEK	8
TERÉNNÍ PRÁCE	10
Laboratorní umělý mokřad.....	10
Terénní umělý mokřad	12
Lokalita Trhové Dušníky	13
Lokalita Dražice	15
EXPERTNÍ SYSTÉM Mipar 2.0	18
Popis expertního systému	19
Výsledky ověření expertního systému	20
Citlivostní analýza.....	22
ZÁVĚR	23
POUŽITÁ LITERATURA	25
PUBLIKAČNÍ ČINNOST	28
ŽIVOTOPIS	30

ÚVOD

V současné době zájem o migrační zkoušky v ČR roste. Týká se to především určování migračních vlastností nanočástic železa, které je využíváno pro sanace starých ekologických zátěží. Provedením migrační zkoušky můžeme získat základní představu o hydrogeologickém prostředí a hodnoty migračních parametrů. Používání migračních zkoušek v ČR za účelem získání dat pro zvýšení účinnosti sanačních systému dokládá jejich velký aplikační význam, viz např. (Pitrák et al. 2007; Datel et al. 2009; Mašín et al. 2009; Sequensová et al. 2009; Vojtěchová et al. 2010, Němeček et al. 2015). V současné době se migrační zkoušky začínají také používat při projektování kořenových čistíren, a při ověřování jejich účinnosti. Znalost migračních parametrů je také nezbytná pro efektivní nakládání s podzemními vodami a pro jejich ochranu. Terénní a laboratorní migrační zkoušky jsou také velmi efektivní metody pro určení řídicích migračních (transportních) procesů a hodnot migračních parametrů pro použití v predikčních modelech. Migrační zkoušky jsou tak tématem s velkým aplikačním potenciálem jak v oblasti ochrany životního prostředí, tak i v oblasti vodního hospodářství. Problémem, který nadále trvá, je chybějící metodika, jak pro provádění migračních zkoušek tak pro jejich vyhodnocování. Vývoj a aplikace migračních zkoušek ve vhodných měřítkách se tak stává nutností.

CÍLE

Využití teoretických základů o migraci kontaminačních látek v podzemních vodách pro vypracování metodologie terénních a laboratorních migračních zkoušek.

Vytvoření modelu vybraných lokalit (hydrogeologické jednotky (oblasti) a umělý mokřad) ve kterém budou ověřeny výchozí předpoklady, a také vyzkoušen vliv zjištěných migračních parametrů. Provedení a vyhodnocení terénních migračních zkoušek a porovnání zjištěných výsledků s modelovým řešením.

Ověření použitelnosti různých druhů indikátorů pro dané podmínky a druh znečištění. Zjištění účinnosti/efektivity u konkrétních druhů indikátorů.

Poukázání na nezbytnost a výhody provádění migračních zkoušek v rámci příprav sanačního projektu.

Vytvoření uživatelsky jednoduchého programu, který na základě vstupních dat vypočítá hodnoty vstupních parametrů.

VÝZNAM A MOŽNOSTI VYUŽITÍ MIGRAČNÍCH ZKOUŠEK

Základem migrační zkoušky je dotace indikátoru (vrtem, rozstříkem nebo nálevem) do zkoumaného hydrogeologického tělesa nebo vzorku. V jiném, popřípadě ve stejném místě (místo dotace), se zjišťuje koncentrace indikátoru. Ze znalostí filtračních podmínek a koncentrační (průnikové, indikační) křivky, pak podle výpočetních vztahů, které nejlépe vyjadřují podmínky migrace, vypočítáme hodnoty migračních parametrů podmiňující podmínky přenosu hmoty (koncentrace) či energie (tepla, radioaktivity) v daném prostředí (Mucha, Šestakov 1987; Beneš 1995; Käss 1998; Field 2002). Mezi základní sledované migrační parametry patří pórovitost, hydrodynamická disperze, disperzivita a sorpce. Určování parametrů ztěžují omezené možnosti přímého pozorování a odebrání vzorků pod povrchem země. Terénní migrační zkoušky jsou tak vysoce účinnou metodou pro určení řídicích transportních procesů, stejně tak jako hodnot důležitých transportních parametrů pro použití v predikčních modelech a pro ověření shody remediačního návrhu (Glass, Finley 2005).

Migrační zkoušky jsou obecně důležitým nástrojem pro předpovídání vývoje podzemního toku a migrace kontaminujících látek ve zvodních, za účelem ochrany cenných zdrojů pitné vody. Využití nacházejí při zkoumání spojitosti puklinových hornin v podloží (např. Birk et al. 2005), a k určení vlastností transportu roztoku a parametrů chemických reakcí, jako je distribuční koeficient pro přenos hmoty mezi kapalinou a pevnou fází (Davis et al. 2001). Výsledky migračních zkoušek se uplatňují pro zvýšení přesnosti modelů, které jsou často omezeny absencí terénních dat ve vhodném měřítku (disperzivita; Jakobsen et al. 1993). Protože jsou modely podzemní vody široce používány (predikce proudění, transport a osud roztoku znečištění, ochrana zdrojů vod), jsou důležitým nástrojem v hydrogeologické a inženýrsko ekologické praxi (Yang et al. 2001). Znalost řídicích procesů migrace látek je také klíčovým prvkem v otázkách bezpečného uložení radioaktivního anebo nebezpečného odpadu (Webster et al. 1970). Migrační zkoušky se využívají i v oblasti geotermálních zdrojů energie, kde je zjišťováno, jak získat větší množství termální energie, a také možný ochlazovací vliv produkčních vrtů (Axelson et al.

2005; Ayling et al. 2015). Migrační zkoušky nacházejí uplatnění také v naftovém inženýrství, a to konkrétně při výpočtech vytěžitelnosti zásob ložisek ropy (Ramírez-Sabag et al. 2005). Podobný druh zkoušek se provádí také při kontrole těsnosti produktovodů (Golding 2001). Migrační zkoušky jsou také zásadní pro návrh a provedení efektivní remediace kontaminantu. Umožňují rozhodnout, na jakou část znečištění je nejlepší zaměřit sanační práce (Alter et al. 2003). Navíc je-li migrační zkouška provedena před a po sanaci lze odhadnout její účinnost (Shook et al. 2004).

Uplatnění nacházejí migrační zkoušky i v umělých (konstruovaných) mokřadech využívaných k čištění odpadní vody, které se v posledních dvou dekadách rychle rozšířily. Proto se rozšiřuje provádění experimentů, které mají za cíl lepší porozumění mokřadům a jejich neustálé vylepšování (Schmid et al. 2004). Mezi takovéto experimenty se řadí i migrační zkoušky. Provedení migrační zkoušky nám pomůže objasnit procesy probíhající v mokřadu a určit jeho základní parametry. Výsledky migračních zkoušek prováděných v mokřadech slouží také ke kalibraci a validaci modelů umělých mokřadů, které mohou sloužit pro optimalizaci proudění (např. Langergraber et al. 2009), návrh optimálního designu (např. Su et al. 2009), nebo simulaci a predikci odstraňování různých druhů znečištění (např. Goulet et al. 2001).

Hlavním cílem migračních zkoušek je tedy stanovení podmínek určujících advektivní a difúzně disperzní migraci. Význam mají hlavně v průlinopuklinových a puklinových kolektorech. Shrnutím výše uvedeného můžeme napsat, že migrační zkoušky mají význam pro posouzení:

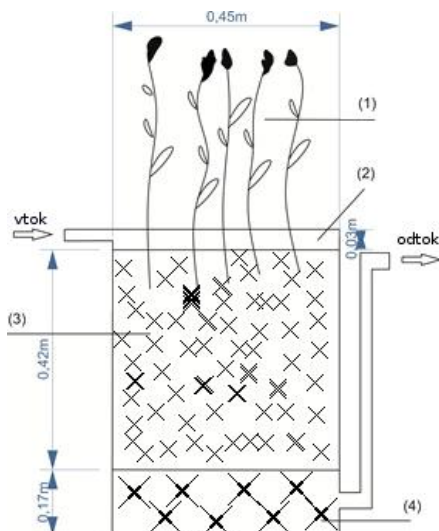
- migračních podmínek,
- zásob podzemních vod,
- ukládání odpadu,
- podmínek sanace a sanovatelnosti látky,
- funkčnosti umělého mokřadu.

TERÉNNÍ PRÁCE

V rámci disertační práce byly uskutečněny migrační zkoušky na dvou vybraných terénních lokalitách. Dále byly provedeny migrační zkoušky v umělém mokřadu laboratorním a v umělém mokřadu terénním. Součástí práce je i jednoduchý expertní systém sloužící k vyhodnocení dat z migračních zkoušek. Program je založen na základě analytických řešení, která jsou popsána v disertační práci.

Laboratorní umělý mokřad

Migrační zkoušky v umělých mokřadech jsou založené na stejném principu jako migrační zkoušky prováděné v hydrogeologickém prostředí. Tzn. dotace na vstupu do mokřadu a měření koncentrace na odtoku z mokřadu. Jejich specifikem je, že je proudění, a tím i šíření indikátoru ovlivněno rostlinami. Jako indikátor používaný při migračních zkouškách v umělém mokřadu byl používán bromid draselný (KBr), pro jeho velké rozšíření v obdobných pokusech.



Obr. 1 Schéma laboratorního umělého mokřadu (1) *Phragmites australis*, (2) štěrk 4-8 mm, (3) hlavní substrát, (4) štěrk 8-16 mm

Pro laboratorní migrační zkoušky byl sestaven umělý mokřad, který je vyroben z plastového barelu o objemu 100 l. Umělý mokřad je osázen rákosem (*Phragmites australis*; Obr. 1). Doba zdržení mokřadu je přibližně 8 dní a hydraulická vodivost se v průběhu prvního roku fungování mokřadu snížila z $0,032 \text{ m s}^{-1}$ na $0,005 \text{ m s}^{-1}$. Projekt je zaměřen na analýzy a použitelnost komplexních laboratorních testů a jejich verifikaci matematickým modelováním, zaměřeným na analyzování a definování prostorových heterogenit v kořenové čistírně odpadních vod. K určení parametrů mokřadu byly provedeny dvě migrační zkoušky. První migrační zkouška byla provedena ve chvíli, kdy kořenový systém nebyl ještě zcela vyvinutý. Druhá migrační zkouška byla provedena již v době plného fungování umělého mokřadu, kdy dosahoval nejvyšší efektivity. Při obou zkouškách byla použita pulsní dotace indikátoru. Celkové množství indikátoru bylo 0,1 g KBr rozpuštěného v 0,5 l vody v první zkoušce a 0,5 g KBr rozpuštěného v 50 ml vody v druhé zkoušce. Vzorky na odtoku z mokřadu byly odebírány pětkrát denně po dobu dvou týdnů. Z tvaru koncentrační křivky byly vyhodnoceny vlastnosti substrátu mokřadu. Pro modelování umělého mokřadu byl využit program Hydrus 2D/3D.

V expertním systému Mipar 2.0 byly vyhodnoceny obě migrační zkoušky. Výsledné hodnoty průměrné doby zdržení a indexu hydraulické efektivity z první zkoušky jsou 139 h a 0,24, a z druhé migrační zkoušky 205 h a 0,97. Delší průměrná doba zdržení koresponduje s větším odporem filtračního lože, a to hlavně vlivem kořenového systému, který se vytvořil v období mezi oběma zkouškami (cca 90 dní). Velmi nízká hodnota hydraulické efektivity z první migrační zkoušky, značící nesprávně pracující umělý mokřad, je způsobena krátkou dobou, která uplynula od uvedení umělého mokřadu do provozu. Hodnota z druhé zkoušky se téměř blíží jedné, to znamená správně fungující mokřad. Migrační zkoušky potvrdily vliv kořenového systému na proudění vody. První zkouška potvrdila počáteční dobu zdržení o délce pěti dní; druhá ukazuje vliv kořenového systému, kdy se průměrná doba zdržení prodloužila na přibližně 8 dní. I z hodnot dalších parametrů lze odvodit uniformnější proudění odpadní vody v tělese mokřadu během druhé migrační zkoušky (hodnota zkratk a disperzní index). Překvapující je nižší návratnost indikátoru v první zkoušce. Modelové řešení potvrdilo přítomnost mrtvých zón a preferenčního proudění

v mokřadu. Výsledná modelovaná data popisovala data terénní relativně přesně ($R^2 = 0,88$).

Terénní umělý mokřad

Umělý mokřad se nachází v obci Křešín, situované v Brdské pahorkatině 15 km severně od města Příbram, kde slouží jako kořenová čistírna odpadních vod (KČOV). KČOV se skládá ze tří lineárně propojených nádrží. Kapacita KČOV je projektována pro 200 ekvivalentních obyvatel, a její celková plocha je 895 m^2 , $Q_{24} = 126 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. V místě vtoku do mokřadu byl dotován indikátor, a v místě odtoku z mokřadu byla měřena jeho koncentrace. Při zkoušce byl použit jako indikátor bromid draselný. Při migrační zkoušce byla použita pulsní dotace indikátoru. Dotované množství indikátoru bylo 100 g, které bylo rozpuštěné v 10 l obyčejné kohoutkové vody při první zkoušce a 200 g rozpuštěných v pěti litrech vody při druhém testu. Dotován byl při plném provozu. Vzorky byly odebírány v pětihodinovém intervalu po dobu 33 a 40 dnů.

Model Kořenové čistírny odpadních vod byl vytvořený s využitím Modflow s rozhraním Ground Water Modelling (GMS 7.0). Modflow kód není primárně určený k modelování mokřadů, ale jeho použití je snadné, a na modelování mokřadů a rašelinišť ho s úspěchem použili již jiní autoři. Pro určení koncentrace BOD, NL a indikátoru byl použit modul MT3DMS (Modular 3-D Multi-Species Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems).

Základní vyhodnocení výsledných průnikových křivek bylo provedeno na základě literatury podle tvaru a charakteristických bodů křivek. Vlivem dotace indikátoru do předčistiřovací nádrže došlo k naředění indikátoru, a také k prodloužení doby dotace. Během odebírání vzorků se nepodařilo zachytit úplný konec migrace indikátoru. To bylo způsobeno příliš časným ukončením vzorkování, protože na základě předběžných výpočtů byla předpokládána maximálně čtrnácti denní doba migrace. Průměrná doba zdržení je tak delší než nominální doba zdržení, což značí přítomnost mrtvých zón. Dva vrcholy koncentrační křivky značí dvě preferenční

cesty proudění. První vrchol ale nedosahuje úrovně druhého, může se tak jednat i o chybu vzniklou při vzorkování, nebo vliv nestálosti průtoku odpadní vody mokřadem. Dalším možným vysvětlením je, že je v KČOV jedna preferenční cesta, kde je proudění rychlejší než v ostatních částech KČOV. Místa se stagnujícím prouděním indikuje naopak dlouhotrvající závěr koncentrační křivky. Existence mrtvých zón a zón s preferenčním prouděním je tak na základě migrační zkoušky prokázána.

Z koncentrační křivky byla vypočítána průměrná doba zdržení t_m , která byla 462 h během první zkoušky a 438 h během druhé zkoušky. Je tedy delší než teoretická nominální doba zdržení, která je 372 h. To dokazuje přítomnost mrtvých zón. Rychlý nárůst koncentrace ukazuje i na přítomnost preferenčního proudění. Index hydraulické efektivity KČOV $\lambda = 1,1$ a $1,7$ pro první a druhou zkoušku. První hodnota ukazuje na velmi dobrou hydraulickou efektivitu KČOV. To znamená, že KČOV je vhodně zkonstruovaná. Ke zlepšení situace s mrtvými zónami a preferenčním prouděním by přispělo zvýšení efektivního objemu vody v KČOV. Druhá hodnota je pravděpodobně ovlivněna přívalovými dešti, které způsobily rychlý pokles indikátoru z jeho maxima na nulové hodnoty (došlo k vymytí indikátoru z tělesa KČOV).

Lokalita Trhové Dušníky

Lokalita se nachází u obce Trhové Dušníky, která je vzdálená 2 km severně od Příbrami. Lokalita je situována v nivě říčky Litavky, vzdálená cca 10 m od jejího toku, v místě kontaminace toxickými kovy. Historická kontaminace byla způsobena především nedaleko umístěnými kovohutěmi (cca 2,5 km), kde byly zpracovávány druhotně vytěžené materiály pro výrobu autobaterií. Druhý zdroj znečištění vznikl vlivem těžby a úpravny rud ve vyšších partiích Litavky. V současnosti k dalšímu znečišťování území již nedochází. Kontaminace půdy silně překračuje doporučené limity obsahu olova, zinku a kadmia v zemědělské půdě. Na lokalitě jsou umístěny tři vrty, které jsou od sebe vzdáleny cca 3,5 a 4 metry. Vrty jsou umístěny na proudnici podzemní vody.

Na terénní lokalitě Trhové Dušníky byly provedeny dvě zkoušky v neovlivněném hydrodynamickém poli. Jako indikátor byl použit chlorid sodný o koncentraci 1 M. Jelikož jsou na lokalitě tři vrty, byly pro vyhodnocení použity čtyři různé metody:

- Dotace a ředění na jednom vrtu
- Metoda dvou vrtů
- Metoda dvou vrtů s využitím časových momentů
- Metoda tří vrtů

Výsledné hodnoty rychlosti podzemní vody odvozené na základě těchto metod jsou v tabulce Tab. 1. Odvozená hodnota hydraulické vodivosti K je $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$. Hodnota rychlosti proudění podzemní vody stanovená na základě metody časových momentů ($0,044 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$) je rychlost skutečná, z toho dána hodnota efektivní pórovitosti $n_e = 0,61$.

Druh MZ Parametr	Dotace a ředění na	Metoda dvou vrtů	Metoda dvou vrtů-	Metoda tří vrtů
$v \text{ (m}^3\text{h}^{-1}\text{)}$	0,036	0,028	0,044	0,026
$\alpha \text{ (m)}$			0,85	0,21
$D_L \text{ (m}^2\text{h}^{-1}\text{)}$			0,056	0,036

Tab. 1 Výsledné hodnoty parametrů ze čtyř migračních zkoušek

Problémem, který způsobil nejistoty při vyhodnocování dat, jsou velké fluktuační požadových hodnot na lokalitě. To mohlo ovlivnit výsledné hodnoty sledovaných parametrů, protože se obtížně separovaly požadové hodnoty od hodnot indikátoru. I přes umístění lokality blízko povrchového toku, je hladina podzemní vody relativně konstantní. Ovšem negativní vliv změny hladiny podzemní vody nelze vyloučit. Během první migrační zkoušky došlo dokonce vlivem silných přívalových dešťů k rychlému zvýšení hladiny vody v povrchovém toku, což mělo za následek vytvoření záporného hydraulického gradientu podzemní vody.

Lokalita Dražice

Lokalita se nachází v Dražicích, části města Benátky nad Jizerou. Leží na levém břehu reky Jizery, 140 m východně od řeky, v transformátorové stanici. Během rekonstrukce bylo zjištěno, že v minulosti došlo na lokalitě ke znečištění horninového prostředí transformátorovými oleji. Migrační zkoušky byly prováděny podle více typů schémat. To umožňuje srovnání výsledných hodnot a ověření použité metody, její náročnosti vzhledem k množství a významu získaných informací. Pro zkoušky byly použity tři indikátory, a to chlorid sodný (NaCl), Rhodamin 6G (R6G) a Fluorescein.

Provedeny a vyhodnoceny byly dva typy zkoušek v neovlivněném hydrodynamickém poli:

- migrační zkouška s využitím jednoho vrtu - dotace a ředění indikátoru ve vrtu
- migrační zkouška se dvěma vrty.

A zkoušky v ovlivněném hydrodynamickém poli:

- migrační zkouška na jednom vrtu (dotace indikátoru a jeho zpětné čerpání)
- zkouška párová.

Migrační zkoušky v neovlivněném hydrodynamickém poli

Roztok indikátoru připravený rozpuštěním 1 kg NaCl v deseti litrech vody, ke kterému bylo přidáno 10g R6G, byl impulzně dotován do vrtu. Vzorky byly odebírány automatickým vzorkovačem, a současně byla měřena vodivost multi-parametrovou sondou. Během zkoušky s využitím jednoho vrtu byla sonda umístěna do dotačního vrtu, a během zkoušky na dvou vrtech byla umístěna do vrtu pozorovacího. Interval zaznamenávající vodivost byl nastaven na 20 minut. Automatický vzorkovač odebíral vzorky v intervalu dvou hodin. Odebrané vzorky byly poté převezeny k analýze do laboratoře.

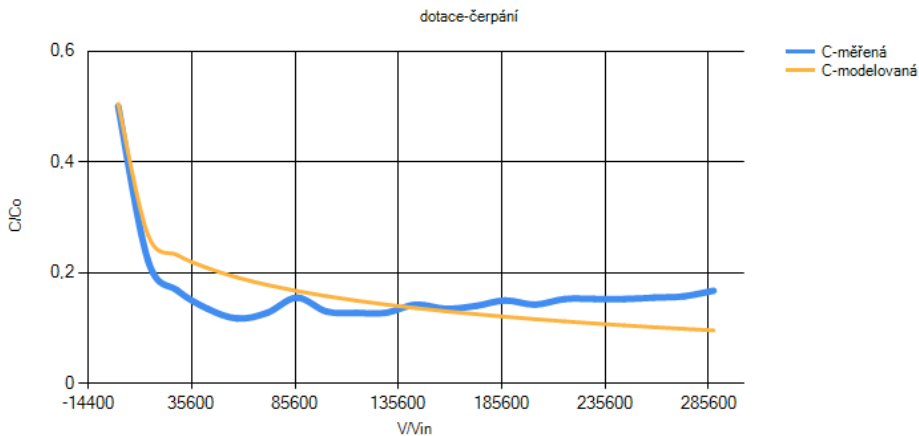
Pro migrační zkoušky v ovlivněném hydrodynamickém poli byl dotován chlorid sodný (NaCl) a fluorescenční barvivo Rhodamin (R6G) případně Fluorescein. Roztok indikátoru byl připraven rozpuštěním 1 kg NaCl v deseti litrech vody. Poté bylo přidáno 10g R6G. Roztok byl dotován do vrtu impulzně. Zpětné čerpání indikátoru bylo zahájeno čtyři hodiny po dotaci. Čerpané množství bylo $0,0005 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Vzorky byly odebírány automatickým vzorkovačem, a současně byla měřena vodivost multi-parametrovou sondou. Interval zaznamenávající vodivost byl nastaven na 20 minut. Automatický vzorkovač odebíral vzorky v intervalu tří hodin. Odebrané vzorky byly poté převezeny k analýze do laboratoře.

Model lokality byl vytvořen v softwaru GMS 7.0. Při vytváření modelu byly využity údaje o půdním profilu, které byly získány při konstrukci vrtů. Hodnota pórovitosti modelované výsledky příliš neovlivňuje, ale její znalost zvyšuje objektivitu modelu. Na hodnoty disperzivity je model citlivý více.

Z obou zkoušek v neovlivněném hydrodynamickém poli byla spočítána pórovitost. Hodnota pórovitosti ze zkoušky na jednom vrtu je 0,3. To je reálná hodnota pro tuto lokalitu. Profil vrtu je relativně homogenní, a tak se dá hodnota považovat za průměrnou hodnotu pro celou mocnost zvodně. Hodnota z druhé zkoušky (migrační zkouška na dvou vrtech; je 0,17, což dobře nekoresponduje s danou oblastí. To mohlo být způsobeno betonovými základy transformátoru, které mohli ovlivňovat proudění podzemní vody. Druhým důvodem nepřesností patrně byla doznívající povodňová vlna, která vyplavila celou oblast. Z obou křivek byla vypočítána také rychlost proudění podzemní vody. Hodnota ze zkoušky na jednom vrtu je $7 \cdot 10^{-7}$ a $5,2 \cdot 10^{-7}$ ze zkoušky na dvou vrtech. Hodnoty rychlosti byly použité pro opětovný výpočet pórovitosti, přičemž hodnota byla v tomto případě 0,35. Disperzivita odvozená na základě metody časových momentů je 2,5 m, dopočítaná hydraulická vodivost má hodnotu $8,6 \cdot 10^{-5}$.

Na základě dat z migrační zkoušky dotace – čerpání na jednom vrtu byla spočítána rychlost podzemní vody – $0,0007 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, pórovitost - 0,42 a disperzivita – 1,74 m.

Graf modelovaných a měřených hodnot fluoresceinu z expertního systému je zobrazen na obrázku Obr. 2. Pro ověření výsledků byla hodnota pórovitosti použita pro výpočet rychlosti podzemní vody jinou metodou. Přičemž vypočtené hodnoty rychlosti podzemní vody se téměř nelišily, tzn., že hodnotu pórovitosti je možné považovat za správnou, i když se hodnota liší od hodnoty ($n = 0,3$) zjištěné z migrační zkoušky dotace a ředění ve vrtu.



Obr. 2 Koncentrační křivka: nálev-čerpání na jednom vrtu (výstup z Mipar 2.0)

Použité indikátory jsou při migračních zkouškách často používány. Všechny mají ovšem svá omezení. Hlavním problémem solného roztoku indikátoru je vliv hustoty. Jeho použití je ovšem v malých koncentracích vhodné, a to hlavně při zkouškách prováděných na jednom vrtu. I přes to může tak dojít k ovlivnění koncentrační křivky (Schmid et al. 2004). Použití R6G jako konzervativního indikátoru je na základě našich výsledků nevhodné, značně podléhá sorpci. Sorpce nebyla zjišťována, ovšem z kvantitativní analýzy je patrné, že sorpce má na dané lokalitě velký vliv. Použití fluoresceinu jako konzervativního indikátoru se ukázalo na dané lokalitě jako vhodné. Jeho pohyb v podzemní vodě je pomalejší, než pochyb chloridů. To je patrné i ze zkoušky dotace a čerpání na jednom vrtu, kdy byla normovaná koncentrace fluoresceinu vyšší než koncentrace chloridů.

EXPERTNÍ SYSTÉM MIPAR 2.0

Výsledkem disertační práce je expertní systém Mipar 2.0, který slouží k vyhodnocení migračních zkoušek. Základem programu je série výpočtů, které jsou potřebné pro jednotlivé metody. Metody výpočtu parametrů jsou založeny na analytických řešeních advektivně disperzní rovnice při daných podmínkách. Vytvořený program slouží k rychlému vyhodnocení terénních dat z migračních zkoušek za účelem určení vlastností zvodně. Výsledky lze také užít k ověření kvality numerických modelů. Ve složitých hydrogeologických systémech, můžou být analytická řešení také užitečná, protože můžou poskytnout odhady rychlostí šíření látky, a tak pomoci při sběru dat a monitoringu kvality vody.

Expertní systém pro vyhodnocování migračních zkoušek je vytvořen v programu Microsoft Visual Studio Community 2013, který je zdarma volně ke stažení ze stránek Microsoftu pouze s nutností registrace. Použití programovacího jazyka C# umožňuje využití prakticky na všech osobních počítačích, pouze s nainstalovaným .NET frameworkem ve verzi 4.0, který je také zdarma a nejsou tak potřeba žádné další investice. Při psaní kódu byla využita volná třída SpecialFunction, která obsahuje funkce, které nejsou obsaženy v třídě System.Math Visual Studia. Dále byla využita knihovna Math.NET Numerics spadající pod Math.NET což je otevřená iniciativa vytvářející matematické nástroje.

Analytická řešení jsou odvozena pro idealizovaný systém. V tomto systému se předpokládá jednotná rychlost podzemní vody, směr proudění je ve směru osy x a je konstantní. Pórovitost a koeficient hydrodynamické disperze jsou také uvažovány jako konstantní (Wexler 1989).

Předpoklady pro řešení:

- pórovité prostředí je homogenní a izotropní
- režim proudění je jednoduchý – jednorozměrný nebo radiální
- proudění je stacionární
- koncentrace rozpuštěné látky ve vodě neovlivňuje její tokové vlastnosti

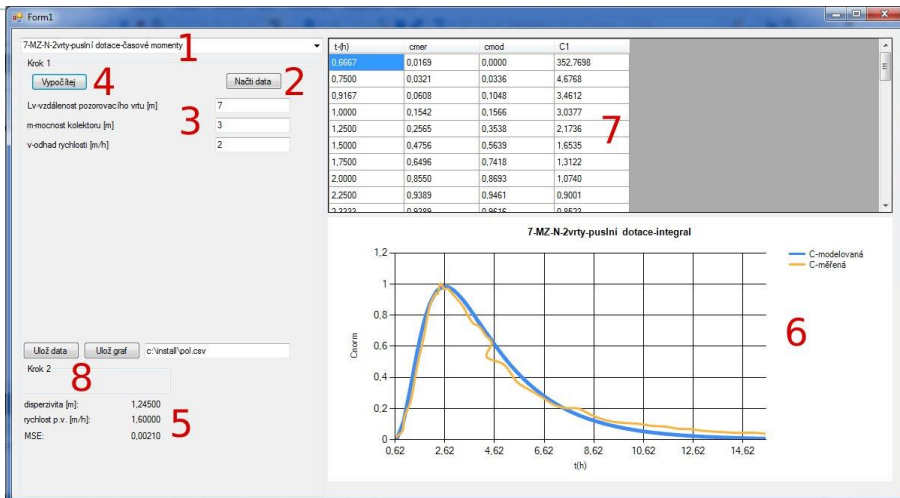
- pórovité prostředí je nedeformovatelné
- platí jednoduché počáteční a okrajové podmínky
- koeficient hydrodynamické disperze je uvažován v lineární závislosti na rychlosti proudění (Beneš 1995)

Vytvořený expertní systém obsahuje

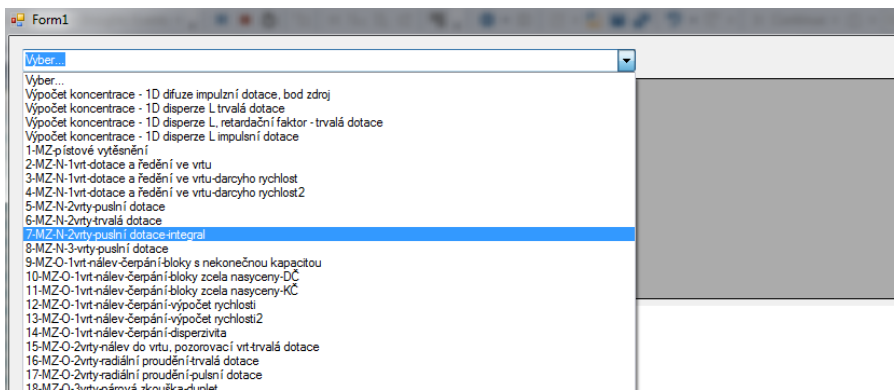
- čtyři metody pro výpočet koncentrace v místě a čase
- sedm metod pro výpočet migrační zkoušky v neovlivněném hydrodynamickém poli
- třináct metod pro výpočet migrační zkoušky v ovlivněném hydrodynamickém poli
- jednu metodu pro výpočet migrační zkoušky v umělém mokřadu
- jednu metodu pro doplnění chybějících dat v klesající části křivky

Popis expertního systému

Po spuštění programu se zobrazí okno programu, kde se vybírá metoda, která má být použita, zadávají se vstupní parametry a načítají data. Současně se v tomto okně zobrazují výsledky a graf. Okno také obsahuje pole pro zapsání cesty nutné pro uložení výsledků a grafu. Při výběru jednotlivých metod (Obr. 4) se zobrazí vstupní pole pro všechny potřebné vstupní parametry. Následně se zmáčknutím tlačítka „vypočítej“ provedou výpočty zvolené metody, vyplní se do polí a zobrazí se dle programem zvolených sloupců z pole graf ve spodní části. U vybraných metod řešení je po zobrazení koncentrační křivky ještě možnost zobrazení grafu pro inverzní migrační zkoušku stisknutím jinak skrytého tlačítka.



Obr. 3 Základní obrazovka programu Mipar 2.0



Obr. 4 Výběr metod v programu

Výsledky ověření expertního systému

Metody výpočtu migračních parametrů, které využívají analýzy časových momentů, a správnost řešení tak nemůže být ověřena na základě rozdílu měřených a modelovaných dat, byly ověřeny na základě dat z odborných článků jejich srovnáním s publikovanými výsledky. Metoda vyhodnocující migrační zkoušku

v neovlivněném proudění s využitím tří vrtů byla ověřena na základě dat publikovaných Schreiberem a Bahrem (2002). Z koncentrační křivky byla spočítána rychlost podzemní vody a disperzivity. Výsledné hodnoty parametrů rychlosti podzemní vody ($0,29 \text{ m.d}^{-1}$) a disperzivity (0,04 m) jsou v rozsahu hodnot publikovaných autory ($0,25 - 0,39 \text{ m.d}^{-1}$ a 0.02 až 0.08 m).

Metoda Řešení migrační zkoušky v konvergentním proudění při impulsní dotaci s využitím časových momentů byla ověřena na základě dat, která publikovali Shook, Forsmann (2005) jako data vzorová v jejich tabulkové aplikaci (Traceranalysis.xls). Hodnoty dosahují vysoké shody, vyjma hodnot pórového objemu, ale i v tomto případě se hodnota liší pouze o přibližně 10 %. Hodnoty pro střední dobu zdržení, pórový objem a Lorentzův koeficient z programu Mipar a hodnoty publikované jsou následující 143; 142 dní, 954; 856 m^3 a 0,186; 0,187.

Výpočet rychlosti proudění podzemní vody a pórovitosti v metodě: Řešení migrační zkoušky v konvergentním proudění při impulsní dotaci s využitím časových momentů je založen na výpočtu doby, kdy dojde k navrácení 50 % indikátoru integrací koncentrační křivky. Správnost řešení byla ověřena na základě dat publikovaných Halleem (1994). Hodnoty rychlosti podzemní vody a pórovitosti odvozené expertním systémem jsou $0,6 \text{ m.d}^{-1}$ a 0,19. Hodnoty publikované $0,5 \text{ m.d}^{-1}$ a 0,16. Rozdíl v hodnotách rychlostí podzemní vody je menší než deset procent a v hodnotách pórovitosti je to méně než dvacet procent. To považuji za rozdíl v dané metodě akceptovatelný.

Kvůli chybějícím vlastním terénním datům, nemohla být vyhodnocena migrační zkouška ve schématu nálevové zkoušky. Proto byla metoda vyhodnocující tento druh zkoušek také ověřena na datech z literatury (Aikens 1986). Výsledná hodnota disperzivity je 5,55 m při MSE 0,15, přičemž výsledná hodnota disperzivity v práci Aikense je 5,08 m (opět rozdíl nepřesahující 10 %).

Citlivostní analýza

Pro ověření citlivosti modelovaných výsledků na změny vstupních parametrů byl každý kalibrační parametr v racionálním rozsahu změněn vzhledem k výsledné hodnotě parametru, a dosazen zpět do expertního systému. Kvalita výsledného řešení byla vyhodnocena srovnáním odmocnin střední kvadratické chyby. Citlivostní analýza ukazuje, že řešení jsou více citlivá na změny disperzivity (případně disperze), méně pak na změny rychlosti podzemní vody.

Změny rychlosti podzemní vody se projevují obecně spíše posunem křivky v čase a změnou jejího maxima, změny disperzivity naopak způsobují změny v ředění roztoku indikátoru ve vrtu a prodlužování průnikové křivky, což je v souladu s literaturou (Geyer et al. 2007). Disperzivita tak nemůže být určena s takovou jistotou, tzn. přesností, jako rychlost podzemní vody (Käss 1998).

ZÁVĚR

Analytické vztahy pro výpočet migračních parametrů umožňují relativně snadno a rychle vyhodnotit přibližnou dobu migrace znečištění z místa zdroje do stanoveného místa, a umožňují tak spočítat průběh znečištění v čase. Proto jsou znalosti migračních parametrů zásadní pro vypracování ekonomicky a odborně odpovídajícího projektu na odstranění ekologické zátěže, respektive pro stanovení reálných termínů, ve kterých je možné dosáhnout stanovených sanačních limitů. To umožní vynaložit finance efektivně a povede to tudíž k jejich úsporám. Výsledné hodnoty migračních parametrů jsou dostatečně přesné pro inženýrské využití, a při použití nejjednodušších typů migračních zkoušek se jedná o rychlou a relativně levnou metodu. Migrační zkoušky tak nacházejí využití hlavně v případech, kdy neznáme hodnoty žádných parametrů a potřebujeme získat alespoň základní představu o hydrogeologickém médiu.

Migrační zkoušky jsou relativně jednoduchý, levný a rychlý způsob, jak získat informace o vlastnostech a parametrech uměle konstruovaného mokřadu, a to jak u mokřadů s podzemní hladinou, tak u mokřadů s volnou hladinou na povrchu. Se zrychlováním vývoje a výstavby mokřadů se musí zlepšovat i metody jejich popisu. Migrační zkoušky nám tak umožní získat informace o hydraulickém výkonu a jeho vlivu na čisticí procesy a umožní nám lépe pochopit procesy, které mokřadu probíhají. Na základě toho můžeme zlepšit návrhy nových mokřadů, nebo navrhnout zlepšení stávajících umělých mokřadů. Pomocí migračních zkoušek můžeme také získat data do matematických modelů a tím zlepšit jejich přesnost a umožnit tak lepší predikci hodnot. Migrační zkoušky by se tak měly provádět v umělých mokřadech opakovaně. Do budoucna je však nutné sjednotit způsoby jejich používání a vyřešit nejasnosti týkající se indikátorů vytvořením metodiky.

Využití migrační zkoušky nacházejí i při vytváření matematických modelů, kdy na základě jejich vyhodnocení můžeme určit řídicí transportní procesy, a hodnoty důležitých migračních parametrů pro použití v predikčních modelech. Například pro

predikci pohybu znečištění v případě vymezování ochranných pásem zdrojů pitné vody, nebo pro ověření funkčnosti sanačního návrhu.

Vytvořený expertní systém, který je stále doplňován o další metody vyhodnocení migračních zkoušek, je vhodný hlavně v případech, kdy je potřeba rychle a operativně vyhodnotit situaci (havárie), ale slouží i k vyhodnocení běžných migračních zkoušek prováděných za účelem stanovení nejlepšího sanačního schématu. Jeho použití je jednoduché a je tak použitelný i pro běžné uživatele, kteří nemají bližší poznatky o dané problematice. Je důležité pamatovat, že výsledky interpretace dat nejsou jedinečným řešením daného případu migrace indikátoru. Další studie by se měly zaměřit na metody umožňující získat sorpční a difuzní parametry, a na některé další formy kolektorů jako je např. model dvojí pórovitosti.

POUŽITÁ LITERATURA

- Aikens A., 1986:** Aalysis of divergent flow tracer test in fractured granite, near Oracle, Arizona. **Axelsson G., Björnsson G., Montalvo F., 2005:** Quantitative Interpretation of Tracer Test Data. Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24. - 29. 4. 2005.
- Alter, S.R., Brusseau, M.L., Piatt, J.J., Ray-M, A., Wang, J.-M., Cain, R.B., 2003:** Use of tracer tests to evaluate the impact of enhanced solubilization flushing on in-situ biodegradation. *Journal of Contaminant Hydrology* 64: 191–202.
- Ayling B., Hogarth R., Rose P., 2015:** Tracer testing at the Habanero EGS site, central Australia. *Geothermics*, In press, Available online 15 April 2015.
- THE UNIVERSITY OF ARIZONA.
- Beneš V., 1995:** Hydrodynamika transportních a transformačních procesů polutantů v podzemních vodách. *Academia, Praha*, 178 str.
- Birk S., Geyer T., Riedl R., Sauter M., 2005:** Process-Based interpretation of tracer tests in carbonate aquifers. *Ground Water* 43/3 : 381-388.
- Datel J., Kobr M., Prochazka M., 2009:** Well logging methods in groundwater surveys of complicated aquifer systems: Bohemian Cretaceous Basin. *Environ Geol* 57:1021–1034.
- Davis J. A., Hess K. M., Coston J. A., Kent D. B., Joye J. L., Brienens P., Campo K. W., 2001:** Multispecies Reactive Tracer Test in a Sand and Gravel Aquifer, Part 1 Experimental Design and Transport of Bromide and Nickel-EDTA Tracers. USEPA, Office of Research and Development Washington DC.
- Field, M. S., 2002:** The QTRACER2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems. Washington, D.C.: National Center for Environmental Assessment.
- Glass R., Finley R. E., 2005:** Field – Scale tracer testing: Determination of controlling transport processes in fractured and heterogenous subsurface environment. Sandian National laboratories.
- Hall S., 1994:** Single-well tracer methods for hydrogeologic evaluation of targer aquifers. International Symposium on Aquifer Thermal Energy Conference, November 14-16, 1994 Tuscaloosa, Alabama.

- Jakobsen R., Jensen K. H., Brettmann K. L., 1993:** Tracer Test in Fractured Chalk 1. Experimental Design and Results Nordic Hydrology, 24, 1993, 263-274.
- Käss W., 1998:** Tracing technique in geohydrology. Rotterdam, Balkema.
- Mašín P., Janoušková P., Beneš P., Kubal M., 2009:** Simulace transportu elementárního nanoželeza a destrukce chlorovaných kontaminantů v porézním prostředí. Inovativní sanační technologie ve výzkumu a praxi II, Konference 2009.
- Mucha I., Šestakov V., 1987:** Hydraulika podzemných vod. ALFA, Bratislava, 338 str.
- Němeček J., Pokorný P., Lacinová L., Černík M., Masopustová Z., Lhotský O., Filipová A., Cajthaml T., 2015:** Combined abiotic and biotic in-situ reduction of hexavalent chromium in groundwater using nZVI and whey: A remedial pilot test, Journal of Hazardous Materials. Journal of Hazardous Materials <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.056>.
- Pitřák M., Mares S., Kobr M., 2006:** A Simple Borehole Dilution Technique in Measuring Horizontal Ground Water Flow. Ground water 45: 89–92.
- Sequensová M., Landa I., Šimek P., Voženílek D., 2009:** Projektování sanačních systémů s využitím nanoželeza a určování jeho migračních parametrů. Inovativní sanační technologie ve výzkumu a praxi II, Konference 2009.
- Vojtěchová A., Bruthans J., Krejča F., 2010:** Comparison of conduit volumes obtained direct measurements and artificial tracer test. Journal of Cave and Karst Studies 72: 156–160.
- Schmid B. H., Hengl M. A., Stephan U., 2004:** Salt tracer experiments in constructed wetland ponds with emergent vegetation: laboratory study on the formation of density layers and its influence on breakthrough curve analysis. Water Research 38: 2095–2102.
- Shook M., Ansley S., Wylie A., 2004:** Tracers and Tracer Testing: Design, Implementation, and Interpretation Methods. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Bechtel BWXT Idaho, LLC.
- Shook G. M., Forsmann J. H., 2005:** Tracer Interpretation Using Temporal Moments on a Spreadsheet. Idaho national laboratory, Idaho.
- Schreiber M., Bahr J., 2002:** Nitrate-enhanced bioremediation of BTEX-contaminated groundwater: parameter estimation from natural-gradient tracer experiments. Journal of Contaminant Hydrology 55: 29– 56.

- Webster D. S., Proctor J.F., Marine I.M., 1970:** Two - well tracer test in fractured crystalline rock. United States Gowerment printing office, Washington, 22 str.
- Wexler E. J. 1989:** Analytical solutionfor one -, two- a tree- dimensional solute transport in ground water systeme with uniform flow. U. S. Geological survey, Tallahassee, Florida, 132 str.
- Yang Y. S., Lin X. Y., Elliot T., Kalin R. M., 2001:** A natural-gradient field tracer test for evaluation of pollutant-transport parameters in a porous-medium aquifer. Hydrogeology Journal 9 : 313-320.

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

Konference

- Landa I., Sequensová M., Šimek P., Voženílek D., 2009: Projektování sanačních systémů s využitím nanoželeza a určování jeho migračních parametrů. Sborník z konference Inovativní sanační technologie ve výzkumu a praxi II, Žďár n.Sázavou, Vodní zdroje Ekomonitor s.r.o. Chrudim.
- Landa I., Šimek P., Hlavová A., 2009: Extreme Hydrogeological Situation and the Importance for Ecological Risk. Sborník z konference Water Policy 2009, ČŽU Praha.
- Šimek P., Landa I., Sequensová M., 2009: Stanovení migračních parametrů ve schématu nálevové zkoušky jako podklad pro využití nanoželeza při sanaci podzemních vod. Sborník z konference Zpracování a interpretace dat z průzkumných a sanačních prací VI, Žďár nad Sázavou, Vodní zdroje Ekomonitor s.r.o. Chrudim.
- Sequensová M., Šimek P., 2010: Examining of iron nanoparticles migration through real soils. Sborník z konference UCOLIS 2010 - University Conference in Life Sciences-Proceedings, Kostelec nad Černými lesy, ČŽU Praha.
- Šimek P., 2010: Vliv lokálních filtračních heterogenit na určení čerpaného množství při sanaci znečištění. Sborník z konference Inovativní sanační technologie ve výzkumu a praxi III, Vodní zdroje Ekomonitor s.r.o. Chrudim.
- Šimek P., Sequensová M., 2010: The use of natural gradient tracer tests. Sborník z konference UCOLIS 2010 - University Conference in Life Sciences-Proceedings, Kostelec nad Černými lesy, ČŽU Praha.
- Šimek P., Sequensová M., 2010: Pilotní migrační zkouška na lokalitě Dražice. Sborník z konference Konference environmentálního inženýrství 2010, FŽP, ČŽU Praha.
- Landa I., Šimek P., Juanola Freixas A., Lavička P., 2011: Dynamika poklesu znečištění na starých ekologických zátěžích při přirozené atenuaci. Sborník z konference Sanační technologie XIV, Uherské Hradiště, Vodní zdroje Ekomonitor s.r.o. Chrudim.
- Landa I., Šimek P., Juanola Freixas A., 2011: Global geological changes and the future. Sborník z konference Hornická Příbram 2011.

Šimek P., 2011: Migrační zkoušky. Sborník z konference environmentálního inženýrství 2011, FŽP ČZU Praha.

Šimek P., 2012: Využití migračních zkoušek v umělých mokřadech. Sborník z konference environmentálního inženýrství a geoenvironmentálních věd 2012, FŽP ČZU Praha.

Šimek P., 2013: Pilotní stopovací zkouška v kořenové čistírně odpadních vod. Sborník z konference environmentálního inženýrství a geoenvironmentálních věd 2013, FŽP ČZU Praha.

Články v odborném recenzovaném periodiku

Šimek P., Landa I., Merhaut M., Juanola Freixas A., 2013: The use of migration tests in constructed wetlands. Waste Forum 3: 170-178.

Landa I., Merhaut M., Šimek P., 2014: Využití odpadní vody z kořenových čistíren při péči o zahrady a zvyšování vydatnosti domovních studní. Zahradnictví 8: 35-37.

Výsledky s právní ochranou – užité vzory

Landa I., Juanola Freixas A., Šimek P.: Systém pro uskladnění teplé vody v podzemním zásobníku akviferového typu.

Landa I., Juanola Freixas A., Šimek P.: Systém pro využití odpadního tepla vod vypouštěných do kanalizačních systémů.

Landa I., Šimek P., Juanola Freixas A.: Stabilní systém ochrany budov před průnikem škodlivých těkavých látek.

Landa I., Juanola Freixas A., Šimek P.: Sorpční vak pro eliminaci toxických kovů.

Landa I., Juanola Freixas A., Šimek P.: Sanační skládka sendvičového typu pro aktivní snižování škodlivosti nebezpečných látek.

Landa I., Juanola Freixas A., Šimek P., Mikulová V.: Kořenové čistírny sendvičového typu s aktivní vrstvou pro eliminaci vybraných nanokovů.

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje:

Jméno a příjmení, titul: Pavel Šimek, Ing.
Datum narození: 30. 4. 1985
Adresa: E. Beneše 313, Příbram 26101
Tel. kontakt: + 420 728 717 709
E - mailová adresa: simekp@fzp.czu.cz
 simekpavel@seznam.cz

Stav: svobodný

Vzdělání:

2009- Česká zemědělská univerzita v Praze
 Fakulta životního prostředí, obor Environmentální modelování
 (Ph.D)

2007 - 2009: Česká zemědělská univerzita v Praze
 Fakulta životního prostředí, obor Environmentální modelování (Ing)
 - Diplomová práce na téma: Základy vyhodnocení migračních
 zkoušek při ochraně životního prostředí.

2004 - 2007: Česká zemědělská univerzita v Praze
 Fakulta lesnická a environmentální, obor Aplikovaná ekologie (Bc) -
 Bakalářská práce na téma: Vývoj zastoupení jedle bělokoré na
 Příbramsku.

1998 - 2004: Gymnázium pod Svatou Horou Příbram
 Maturitní zkouška z předmětů: český jazyk, anglický jazyk, biologie,
 geografie

Zaměstnání:

2013 – doposud: Odborný pracovník – technik VŠ, Česká zemědělská univerzita v Praze

Jazykové znalosti:

Anglický jazyk – pokročilý, Německý jazyk – základy

Počítačové dovednosti:

Pokročilý

MS Office

Modflow – software pro modelování proudění podzemní vody a kontaminantů

ArcGIS – geografický informační systém

GMS – software pro modelování proudění podzemní vody a kontaminantů

HEC – HMS – srážko-odtokový model

Základy

HYDRUS – software pro modelování proudění podzemní vody, tepla a kontaminace

MIKE 11, MIKE 21, MIKE-SHE - hydrologické modely

R – interpretační jazyk

C#, Pascal (Delphi), VBA – kompilační jazyk

Další dovednosti a zkušenosti:

Řidičské oprávnění skupin A, B

Vedení bakalářských prací

- Filla Zdeněk (2011) Význam monitorování hladin a složení důlních vod v těžebních oblastech s ukončenou těžbou polymetalických rud (na příkladu lokality Příbram)
- Příbyl Jan (2013) Expertní systém pro výpočet migračních parametrů
- Fikar Roman (2013) Komplexní nakládání s průsakovými vodami skládkového areálu Orlík
- Kočová Iveta (2013) Nelegální skládky a jejich vliv na životní prostředí
- Dragounová Eva (2013) Transformační procesy v umělých mokřadech
- Lustyková Lucie (2015) Vliv starých skládek na životní prostředí

Řešené projekty

- CIGA 20094202 Rozpracování metodiky využití migračních zkoušek při ochraně životního prostředí
- IGA 20124266 Základy využívání a vyhodnocování migračních zkoušek v umělých mokřadech

