

Metodika

Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech



Číslo projektu: TA02021249

Název projektu: Udržitelné využívání zásob podzemních
vod v ČR

Předkládá:

Název organizace: Česká zemědělská univerzita v Praze

Jméno řešitele: prof. ing. Pavel Pech, CSc.

Autoři: prof. Ing. Pavel Pech, CSc., doc. Ing. Petr Máca, Ph.D.,

doc. Ing. Michal Kuráž, Ph.D., Ing. Daniel Kahuda,

RNDr. František Pastuszek

Příjemce: **Česká zemědělská univerzita v Praze**

Řešitel: **prof. Ing. Pavel Pech, CSc.**

Statutární zástupce: **prof. ing. Jiří Balík CSc., dr.h.c.**

rektor

datum:

podpis: 

Razítko:



Další účastník projektu: **VODNÍ ZDROJE, a.s.**

Řešitel: **Ing. Daniel Kahuda**

Statutární zástupce: **Mgr. Marek Petráček**

místopředseda představenstva

datum:

podpis: 

Razítko:

Mgr. Marek Petráček
místopředseda představenstva
VODNÍ ZDROJE, a.s.

VODNÍ ZDROJE, a.s.
Jindřicha Plachty 535/16, 150 00 Praha 5
IČ: 45274428 DIČ: CZ45274428

OBSAH	STR
1. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	4
2. CÍL METODIKY.....	6
3. POPIS METODIKY	6
3.1 IDEÁLNÍ VRT	6
3.2 POPIS REÁLNÉHO VRTU A DODATEČNÝCH ODPORŮ	8
3.3 NÁVRH NOVÉHO POSTUPU	15
3.4 ZÁSADY PROVÁDĚNÍ KRÁTKODOBÉ ČERPACÍ ZKOUŠKY	20
3.5 PRAKTICKÁ APLIKACE	21
4. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ	25
5. POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY	26
6. PODĚKOVÁNÍ	28
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	26
8. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE	28

1. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

b – výška zvodnělé vrstvy s napjatou hladinou (L)

C – jednotkový faktor zásobnosti vrtu (L^2)

C_D – bezrozměrný koeficient zásobnosti vrtu (rov. (10d))

h – změna (piezometrické) výšky (L)

$h(r, t)$ – piezometrická výška v čase t a ve vzdálenosti r od odčerpávaného vrtu (L)

h_v – výška hladiny vody v odběrovém vrtu (L)

H – původní piezometrická výška v čase $t = 0$ (L)

i_z – sklon prvního přímkového úseku v grafu s vs. $\text{Log } t$ (viz např. obr. 7)

i_{zD} – bezrozměrný sklon prvního přímkového úseku (viz rov. (10f))

K – koeficient hydraulické vodivosti ($L \cdot T^{-1}$)

K_0 - modifikovaná Besselova funkce druhého druhu nultého řádu (imaginárního argumentu)

K_1 - Besselova funkce druhého druhu prvního řádu (imaginárního argumentu)

p – komplexní proměnná

Q – čerpané množství vody z vrtu ($L^3 \cdot T^{-1}$)

Q_p – množství přitékající vody do vrtu ze zvodnělé vrstvy ($L^3 \cdot T^{-1}$)

r – radiální vzdálenost od osy čerpaného vrtu (L)

r_D – bezrozměrný poloměr (viz rov. (10c))

r_v – poloměr čerpaného vrtu (L)

r_w – poloměr dosahu zóny dodatečných odporů (L)

R – dosah depresního kuželu (m)

s – snížení (L)

s_c – přepočtené snížení pro volnou hladinu ve zvodnělé vrstvě (L)

s_D – bezrozměrné snížení (viz rov. (9))

\bar{s}_D – bezrozměrné snížení v Laplaceově prostoru

s_f – snížení způsobené zmenšením aktivního průřezu stěny vrtu (L)

s_k – snížení způsobené kolmatací vrtu (L)

s_o – snížení způsobené dalšími druhy dodatečných odporů (L)

s_p – snížení způsobené neúplným průnikem vrtu (L)

s_t – snížení způsobené třením vody o stěny vrtu (L)

s_{te} - teoretické snížení v odběrném vrtu (bez dodatečných odporů) (L)

s_{tp} - snížení způsobené turbulentním režimem proudění (L)

s_u – snížení způsobené ucpáváním – zachycováním částic horniny nebo obsypu
v otvorech filtru (L)

s_v – snížení v odčerpávaném vrtu (L)

s_{VD} – bezrozměrné snížení v čerpaném vrtu (viz. rov. (10a))

s_w – snížení způsobené působením dodatečných odporů (L)

S – storativita zvodnělé vrstvy (-)

t – čas (T)

t_D - bezrozměrný čas (viz rov. (10b))

T – transmisivita zvodnělé vrstvy ($L^2.T^{-1}$)

u – argument Theisovy stuňové funkce (-)

ΔV – objemová změna kapaliny ve vrtu (L^3)

W – koeficient dodatečných odporů (-)

$W(u)$ – Theisova studňová funkce (-)

γ - Eulerova konstanta (=0,577216)

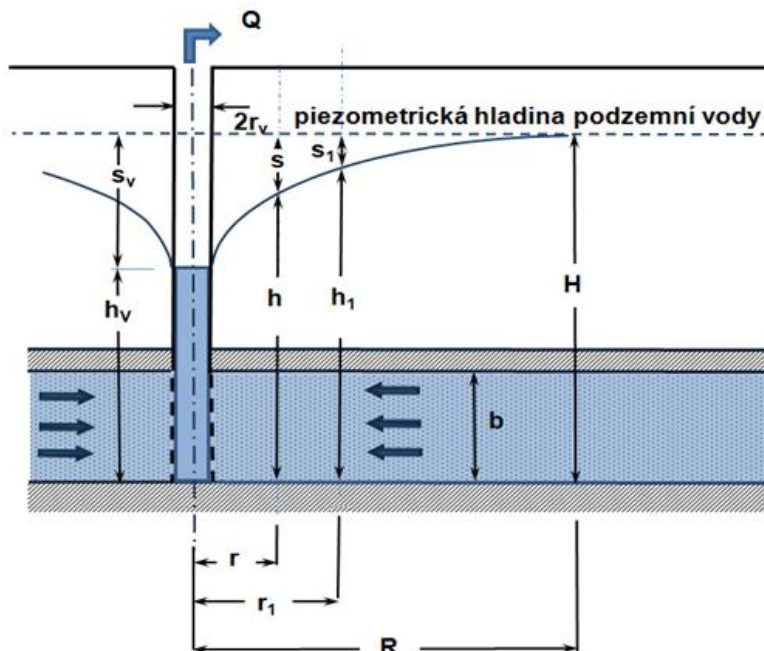
2. CÍL METODIKY

- Cílem metodiky je na základě dlouholetého výzkumu popsat postup při vyhodnocování čerpacích zkoušek na reálných vrtech za neustáleného režimu, kdy u reálných vrtů, oproti vrtům ideálním, uvažujeme v počátečním úseku čerpací zkoušky vliv dodatečných odporů vznikajících ve vlastním vrtu a jeho nejbližším okolí a vliv objemu vody ve vrtu na průběh snížení v čase.
- Využít odvozené metody a navrhnout postup pro vyhodnocení krátkodobé čerpací zkoušky (cca 2- 8 hodin).
- Umožnit získat relevantní informace o stavu vrtu. Metodiku implementovat na vyhodnocení regeneračních zásahů na vrtech a následné sledování vývoje kolmatace v průběhu exploatace vrtu.

3. POPIS METODIKY

3.1 IDEÁLNÍ VRT

Ideální vrt je vrt, na kterém neuvažujeme dodatečné odpory (ve vlastním vrtu i jeho nejbližším okolí tj. do cca 5 m od osy vrtu) a nebere se v úvahu vliv objemu vody ve vrtu na počátek čerpací zkoušky. Depresní křivka začíná na hladině vody v čerpaném vrtu viz obr. 1



Obr. 1 Schéma ideálního vrtu ve zvodnělé vrstvě s napjatou hladinou

Řešení neustáleného proudění k ideálnímu vrtu

Základní rovnice popisující neustálené radiálně symetrické proudění podzemní vody k vrtu v cylindrických souřadnicích má tvar (Theis, 1935)

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1)$$

kde s - snížení (L); r - radiální vzdálenost (L); S - storativita zvodnělé vrstvy (-);

T - transmisivita zvodnělé vrstvy ($L^2 \cdot T^{-1}$); t - čas (T);

Řešení rovnice publikoval C.V. Theis (1935). Rovnici (1) vyřešil za následujících předpokladů:

- Jedná se o zvodnělou vrstvu s napjatou hladinou.
- Zvodnělá vrstva je homogenní a izotropní.
- Výška zvodnělé vrstvy, b je konstantní v celé řešené oblasti.
- Jedná se o nestlačitelnou kapalinu.
- Koeficient transmisivity a storativity jsou v řešené oblasti konstantní v čase i v prostoru.
- Čerpané množství vody z vrtu je v čase konstantní.
- Vrt se nachází v neomezené zvodnělé vrstvě (tj. během celé doby čerpání snížení ve zvodnělé vrstvě vyvolané čerpáním nedosáhne k nepropustné ani napájecí hranici).
- V čase $t = 0$ je piezometrická výška hladiny podzemní vody ve všech místech zvodnělé vrstvy konstantní a je rovna H , a rovněž ve vrtu je výška vody H .
- Platí Darcyho vztah pro filtrační rychlost po celou dobu čerpací zkoušky.
- Objem čerpaného vrtu je zanedbatelně malý a nemusí být při řešení brán v úvahu.
- Na vrtu ani v jeho blízkém okolí nepůsobí dodatečné odpory - jedná se o tzv. "ideální" vrt.

Řešení má tvar (Theis, 1935)

$$s_v = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2)$$

kde $W(u)$ je Theisova studňová funkce, která je vyjádřena ve tvaru nekonečné řady

$$W(u) = -\gamma - \ln u + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{u^n}{n!n} \quad (3)$$

$\gamma = 0,577216$ je Eulerova konstanta;

u – argument Theisovy studňové funkce (-) ... $u = \frac{4 T t}{r^2 S}$;

Pro vyhodnocování čerpacích zkoušek na ideálním vrtu se používá Theisova metoda typových křivek (Theis,1935) a pro pozdější časy čerpání (výskyt 2. přímkového úseku) Jacobova semilogaritmická aproximace (Jacob,C.E.,1946).

3.2 POPIS REÁLNÉHO VRTU A DODATEČNÝCH ODPORŮ

Reálný vrt je takový vrt, kde dodatečné odpory ve vrtu a jeho okolí jsou nenulové a v počátečních časech se nezanedbává odčerpávaný objem vody z vrtu.

DODATEČNÉ ODPORY

Snížení hladiny vody ve “skutečném” vrtu (tj. případ, kdy uvažujeme existenci dodatečných odporů na odčerpávaném vrtu a jeho blízkém okolí) závisí na odporu porézního prostředí nasyceného vodou, viskozitě a na tzv. dodatečných ztrátách vznikajících ve vrtu, na jeho stěnách a blízkém okolí. Pod pojmem dodatečné odpory rozumíme souhrn jevů, jejichž vlivem dochází k odchýlení naměřených hodnot snížení vody na “skutečném” vrtu, oproti teoretickému snížení získanému za předpokladu “ideálního” modelu proudění vody k úplnému vrtu (jedná se o případ, kdy se na vrtu neuvažuje existence dodatečných odporů a vlastní objem vrtu se neprojeví na průběhu přítokové zkoušky, tj. nedochází k ovlivnění snížení tímto objemem viz níže). Snížení hladiny vody

(resp. zvýšení) naměřené na odběrovém vrtu (resp. nálevovém) je potom větší než výpočtové snížení (resp. zvýšení) hladiny vody ve vrtu, které by vyvolal daný hydraulický zásah prostřednictvím hydrodynamicky dokonalého vrtu bez těchto dodatečných odporů. Některé druhy dodatečných odporů mohou vzniknout již při zhotovování vrtu a jejich zdrojem jsou nedostatky a nedokonalosti techniky a technologie hloubení a zejména vystrojení odběrových vrtů (například snížení propustnosti v bezprostředním okolí vrtu vlivem vniknutí výplachu do porézního prostředí nasyceného vodou při rotačním způsobu vrtání, důsledkem čehož vzniká tzv. „kalová kůra“ nebo při nárazovém vrtání, kdy dochází ke zhutnění porézního prostředí v blízkosti vrtu a tím ke snížení propustnosti). Dalšími příčinami vzniku

dodatečných odporů na vrtu jsou různé hydromechanické, chemické, biologické aj. jevy, které se mohou vyskytnout na vrtu a jeho okolí v průběhu využívání vrtu. Znalost velikosti dodatečných odporů, resp. dodatečného snížení, připadajícího na působení dodatečných odporů, je nezbytná při stanovení storativity z údajů o snížení hladiny naměřených na odběrovém vrtu za nestacionárního režimu proudění a při stanovení koeficientu hydraulické vodivosti za stacionárního režimu.

Část snížení připadající na působení dodatečných odporů je možné rozdělit na část snížení způsobené

- *kolmatací vrtu* (s_k) tj. ucpáváním pórů např. jemným materiálem, čímž dochází ke snížení průtočnosti porézního prostředí nebo narušením původní vnitřní struktury porézního prostředí v těsném okolí odběrového vrtu při jeho hloubení a vystrojování (jde o snížení propustnosti porézního prostředí vlivem vniknutí výplachu do zvodnělé vrstvy - při rotačním způsobu vrtání, jehož důsledkem je tzv. kalová kůra, nebo případ, kdy při nárazovém vrtání dojde ke zhutnění porézního prostředí a tím ke snížení propustnosti)

- *zmenšením aktivního průřezu stěny vrtu* pro přítok vody (s_f) tam, kde je stěna vrtu tvořena filtrem, perforovanou pažnicí apod.

- *neúplným průnikem* (s_p) - neúplným otevřením mocnosti zvodnělé vrstvy vrtem (tzv. neúplné vrty)

- *ucpáváním* (s_u) - zachycováním částic horniny nebo obsypu v otvorech filtru, kam přiřazujeme také chemickou inkrustaci a ucpávání otvorů filtru působením mikroorganismů a bakterií

- *třením* (s_t) vody o stěny vrtu a jejím vnitřním třením (do této skupiny zařazujeme i dodatečné odpory vznikající turbulencí uvnitř vrtu)

- *turbulentním režimem proudění* (s_{tp}) ve zvodnělé vrstvě, zejména v blízkosti odběrového vrtu

- dalšími druhy dodatečných odporů (s_o)

Celkové snížení připadající na působení dodatečných odporů vyjádříme rovnicí

$$s_w = s_k + s_f + s_p + s_u + s_t + s_{tp} + s_o \quad (4)$$

s_w - snížení ve vrtu způsobené dodatečnými odpory (L)

Separace jednotlivých složek dodatečných odporů je velmi problematická, a proto v této metodice (stejně jako ve většině publikací zabývajících se zde řešenou

problematikou) je k charakteristice dodatečných odporů užito sumárního bezrozměrného koeficientu dodatečných odporů, W (v anglosaské literatuře označovaném jako skin factor).

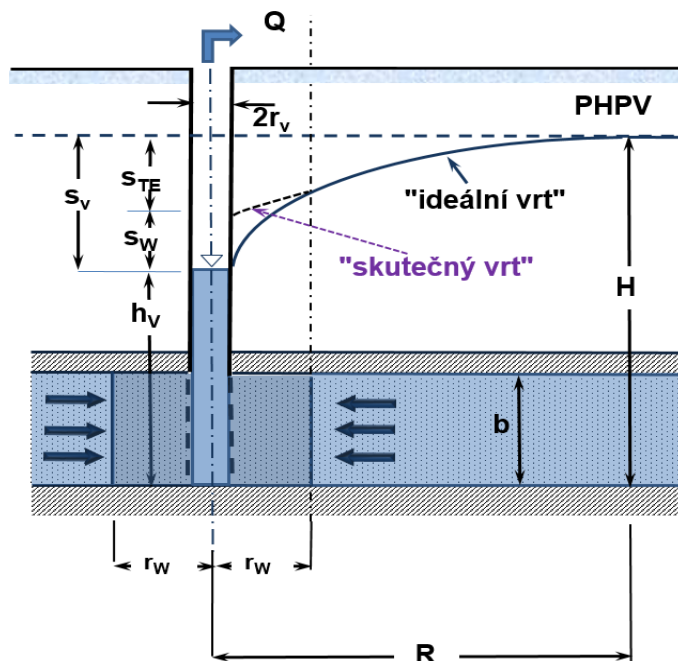
Celkové snížení hladiny vody naměřené v odběrovém vrtu během přítokové zkoušky, s_v lze vyjádřit vztahem (viz obr. 2)

$$s_v = s_{te} + s_w \quad (5)$$

kde

s_{te} - je teoretické snížení hladiny vody na "ideálním" vrtu (nulové dodatečné odpory) (L);

s_w - dodatečné snížení vody ve vrtu způsobené vlivem dodatečných odporů (L);



Obr. 2 Snížení na vrtu s dodatečnými odpory

V metodice se uvažuje pro vyjádření odporů ve vrtu a jeho okolí sumární koeficient dodatečných odporů, W .

Při zanedbání části snížení, které připadá na působení nelineárních odporů s_t a s_{tp} je velikost dodatečného snížení závislá na odebírané vydatnosti, Q podle lineárního

vztahu (van Everdingen, 1953).

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} W \quad (6)$$

kde W – bezrozměrný koeficient dodatečných odporů (-)

ZÁSOBNOST VRTU

Zásobnost vrtu, neboli dodatečný přítok nebo prázdnění vrtu, ovlivňuje zásadním způsobem počáteční úsek přítokové zkoušky. Pokud není brán v úvahu vliv zásobnosti vrtu při vyhodnocování přítokových zkoušek tj. části čerpací zkoušky, která předchází úseku vyhodnotitelnému Jacobovou semilogaritmickou aproximací, dostaneme nesprávné výsledky.

Začneme-li z vrtu čerpat množství vody $Q = \text{konst.}$, je v první fázi čerpána voda pouze z vlastního objemu vrtu a přítok vody do vrtu ze zvodnělé vrstvy je nulový ($Q_p = 0$). S narůstajícím časem odběru množství vody, Q z vrtu se přitékající množství vody bude měnit z nuly do přibližně čerpaného množství Q , přičemž množství vody odčerpávané z vlastního objemu vrtu se bude zmenšovat, až dosáhne zanedbatelné hodnoty vzhledem k přítoku vody Q_p ze zvodnělé vrstvy.

Ramey (1970), který se zabýval vlivem objemu vrtu na průběh čerpací resp. stoupací zkoušky v počátečním časovém úseku u naftových vrtů, definoval tzv. jednotkový faktor zásobnosti vrtu, C ve zjednodušeném tvaru vyjádřeném vztahem

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta h} \quad (7)$$

ΔV - objemová změna kapaliny ve vrtu (L^3); Δh - změna piezometrické výšky (L);

ŘEŠENÍ SNÍŽENÍ NA REÁLNÉM VRTU

Vydeme z rovnice (1) neustáleného radiálně symetrického proudění podzemní vody k vrtu

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (8)$$

Předpoklady pro ideální vrt se doplní o

- přítok vody ze zvodnělé vrstvy do vrtu se mění během čerpací zkoušky z hodnoty $Q_p = 0$ do konečného přítoku $Q_p = Q = \text{konst.}$
- vrt je konečného objemu
- vliv dodatečných odporů na čerpaném vrtu nelze zanedbat a dodatečné odpory působí jen do malé vzdálenosti od vrtu

Agarwal (1970) uvádí řešení základní rovnice neustáleného proudění k reálnému vrtu ve tvaru bezrozměrné snížení v Laplaceově prostoru .

Pro řešení se používají bezrozměrné parametry:

- bezrozměrné snížení piezometrické výšky ve vzdálenosti r od vrtu

$$s_D(r_D, t_D) = \frac{2\pi T}{Q} (H - h(r, t)) \quad (9)$$

kde

$T = K b$ - koeficient transmisivity ($L^2 T^{-1}$)

K - hydraulická vodivost ($L T^{-1}$)

b - mocnost zvodnělé vrstvy tj. vzdálenost mezi dvěma nepropustnými vrstvami
(L)

Q - odběr vody z vrtu ($L^3 T^{-1}$)

$h(r, t)$ - piezometrická výška v čase t a ve vzdálenosti r od odčerpávaného vrtu
(L)

H - původní nesnížená piezometrická výška v čase $t = 0$ (L)

t - čas (T)

t_D - bezrozměrný čas (viz rovnice (10b))

r_D - bezrozměrný poloměr (viz rovnice (10c))

s_{vD} - bezrozměrné snížení hladiny v odběrovém vrtu

$$s_{vD}(t_D) = \frac{2\pi T}{Q} (H - h_v(t)) \quad (10a)$$

h_v - výška hladiny vody v odběrovém vrtu v čase t (L)

t_D - bezrozměrný čas

$$t_D = \frac{T t}{r^2 S} \quad (10b)$$

r_v - poloměr vrtu (L)

S - koeficient storativity (-)

r_D - bezrozměrný poloměr

$$r_D = \frac{r}{r_V} \quad (10c)$$

r - radiální vzdálenost od osy čerpaného vrtu

C_D - bezrozměrný koeficient zásobnosti vrtu

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_V^2 S} \quad (10d)$$

C - jednotkový faktor zásobnosti vrtu (rovnice (7))

W - bezrozměrný koeficient dodatečných odporů z rovnice (6)

$$W = \frac{2\pi T s_w}{Q} \quad (10e)$$

s_w - část snížení ve vrtu, připadající na vliv dodatečných odporů

i_{zD} - bezrozměrný sklon prvního přímkového úseku

$$i_{zD} = \frac{2\pi T i_z}{Q} \quad (10f)$$

i_z - sklon prvního přímkového úseku (v grafu s vs. $\log t$)

Rovnice (1) v bezrozměrných parametrech dle Agarwal et. al (1970):

$$\frac{\partial^2 s_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial s_D}{\partial r_D} = \frac{\partial s_D}{\partial t_D} \quad (11)$$

Počáteční a okrajové podmínky v případě reálného vrtu jsou dány rovnicemi

$$s_D(r_D, 0) = 0 \quad (12a)$$

$$s_D(r_D, t_D) = 0 \quad \text{pro } r_D \rightarrow \infty \quad (12b)$$

$$s_{VD} = s_D + \left(r_D \frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right)_{r_V} W \quad (12c)$$

$$C_D \frac{ds_D}{dt_D} - \left(r_D \frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right) = 1 \quad (12d)$$

K řešení rovnice (11) je užitá jednorozměrná jednostranná Laplaceova transformace. K převodu parciální diferenciální rovnice v bezrozměrných parametrech na obyčejnou diferenciální rovnici je užitá transformační funkce typu

$$F(p) = L(f(t)) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt \quad (13)$$

což je integrální transformace s jádrem $\exp(-pt)$, kde p je komplexní proměnná.

$F(p)$ je obraz daného předmětu $f(t)$

V řešeném případě budeme hledat obraz $F(p)$ ze vztahu

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t_D) e^{-pt_D} dt_D \quad (14)$$

V Laplaceově prostoru je dle Agarwal (1970) řešení ve tvaru pro bezrozměrné snížení

$$\bar{s}_D = \frac{K_0(r_D p^{1/2})}{p \{ p^{1/2} K_1(p^{1/2}) + C_D p [K_0(p^{1/2}) + W p^{1/2} K_1(p^{1/2})] \}} \quad (15)$$

kde \bar{s}_D – bezrozměrné snížení v Laplaceově prostoru:

K_0 - modifikovaná Besselova funkce druhého druhu nultého řádu (imaginárního argumentu)

K_1 - Besselova funkce druhého druhu prvního řádu (imaginárního argumentu)

Další fází řešení je nalezení předmětu $f(t_D)$, z daného obrazu $F(p)$

$$s_D(r_D, t_D) = f(t_D) = L^{-1}(F(p)) \quad (16)$$

Raghavan (1980) prokázal, že pro nalezení předmětu $f(t_D)$, u daného typu řešení, může být užit algoritmus 368 publikovaný Stehfestem (1970). Ten pro originál $f(t_D)$ k Laplaceově obrazu $F(p)$ uvádí vztah (pro dané řešení upraven)

$$f(t_D) = \sum_{j=1}^{n/2} X_j(n/2) P_{n/2+1-j} \quad (17)$$

kde

$$X_j(n/2) = \frac{(-1)^{j-1}}{(n/2)!} \binom{n/2}{j} j(n/2+1-j)^{n/2-1} \quad (18)$$

$$P_n = \frac{\ln 2}{t_D} \frac{(2n)!}{n!(n-1)!} \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (-1)^i F\left((n+i) \frac{\ln 2}{t_D}\right) \quad (19)$$

Hodnota veličiny n byla určena dle Stehfesta (1970) ($n = 10$).

Aplikací Stehfestova algoritmu 368 (inverzní Laplaceova transformace) bylo získáno bezrozměrné snížení hladiny ve vzdálenosti r od odčerpávaného vrtu, s_D a pro snížení hladiny v odběrovém vrtu po dosažení vztahů za bezrozměrné parametry je snížení v odběrovém vrtu vyjádřeno (Pech, 2005)

$$s_v(r_v, t) = \frac{Q}{2\pi T} \sum_{j=1}^k \text{con}(j, k) \sum_{i=0}^m \binom{m}{i} (-1)^i \cdot \frac{K_0(c^{1/2}) - Wc^{1/2} K_1(c^{1/2})}{c^{3/2} [c^{1/2} K_1(c^{1/2}) + C_D c^{1/2} (K_0(c^{1/2}) + Wc^{1/2} K_1(c^{1/2}))]} \quad \dots \quad (20)$$

kde

$$\text{con}(j, k) = \frac{(-1)^{j-1} \binom{k}{j} j m^{k-1} \ln 2}{k \binom{m}{j} t_D r_D m! (m-1)!} \quad (21)$$

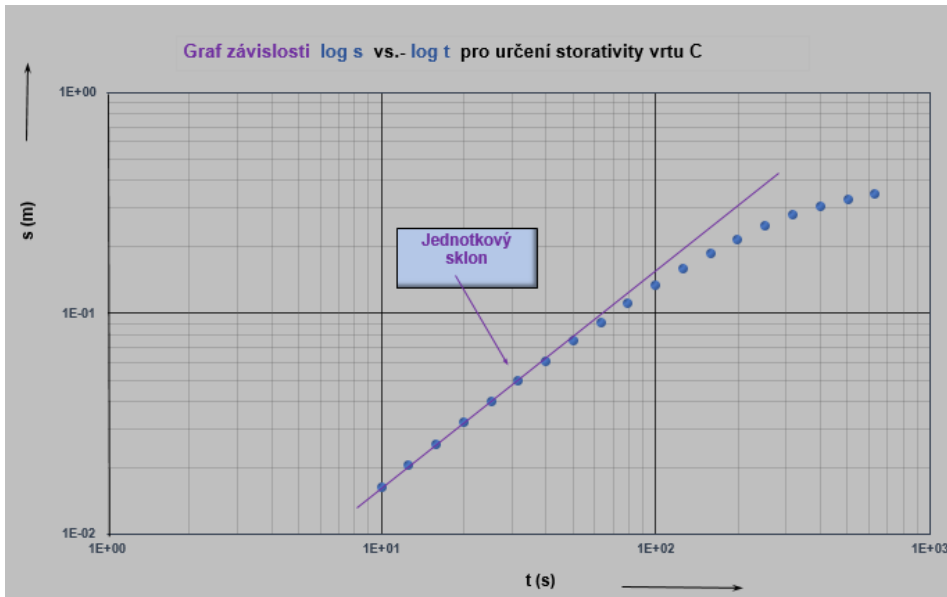
$k = n/2$; $m = k + 1 - j$; $c = (m + i) (\ln 2) / t_D$;

3.3. NÁVRH NOVÉHO POSTUPU

A) URČENÍ BEZROZMĚRNÉ ZÁSOBNOSTI VRTU, C_D

Pro určení bezrozměrného koeficientu zásobnosti vrtu navrhl Ramey (1970) následující postup:

Pro počáteční časy ČZ lze v grafu $\log s$ vs. $\log t$ nalézt přímkovou část se sklonem 45° od vodorovné osy viz obr. 3



Obr. 3 Závislost $\log s$ vs. $\log t$

Potom dle Ramey (1970) jednotkový faktor zásobnosti vrtu je

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} \quad (22)$$

kde t_j , s_j je dvojice odpovídajících si hodnot na přímkovém úseku jednotkového sklonu v grafu $\log s$ vs $\log t$ (obr. 3)

bezrozměrný koeficient zásobnosti vrtu (viz rovnice (10d) je

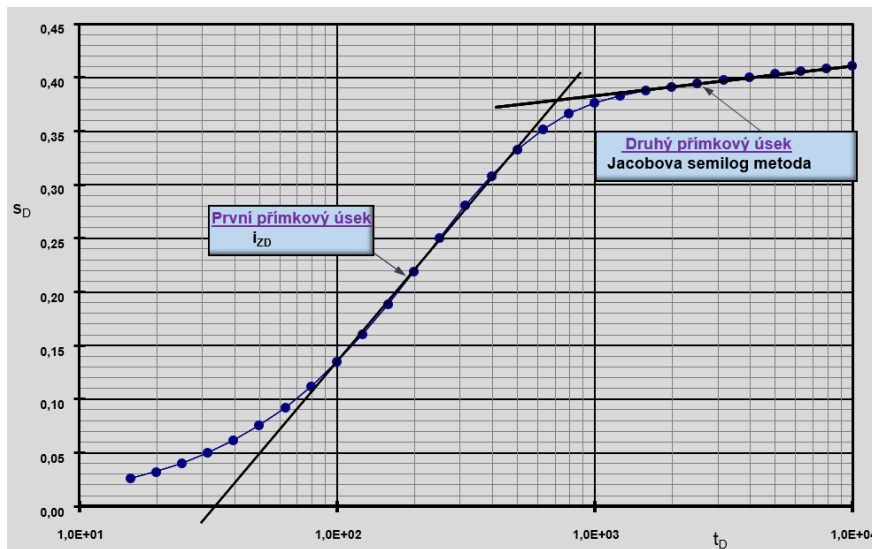
$$C_D = \frac{C}{2\pi r_v^2 S} \quad (23)$$

Na obr. 4 je jako příklad uvedena závislost bezrozměrného snížení v odběrovém vrtu na logaritmu bezrozměrného času, t_D .

ZÁVISLOST BEZROZMĚRNÉHO SKLONU, i_{zD} NA C_D A W

V grafu s_D vs. $\log t_D$ (obr.4) lze nalézt dva přímkové úseky, což je ve shodě se závěry Rivery a Raghavana (1979), kteří na základě vyhodnocení čerpacích zkoušek na 80 naftových vrtech (v semi- logaritmickém grafu (s_D vs. $\log t_D$)) dospěli k témuž závěru. První přímkový úsek se v grafu objevuje v jeho počáteční části, tj. v době, kdy snížení na vrtu (při konstantním odběru Q) je ovlivněno jak dodatečnými odpory na vrtu a jeho blízkém okolí, tak i objemem vrtu (zásobností vrtu). Sklon první přímkové části je označen i_{zD} . Druhý přímkový úsek se v

semilogaritmickém grafu s_D vs. $\log t_D$ objevuje až v další části grafu a odpovídá oblasti, která je vyhodnotitelná Jacobovou semilogaritmickou aproximací.



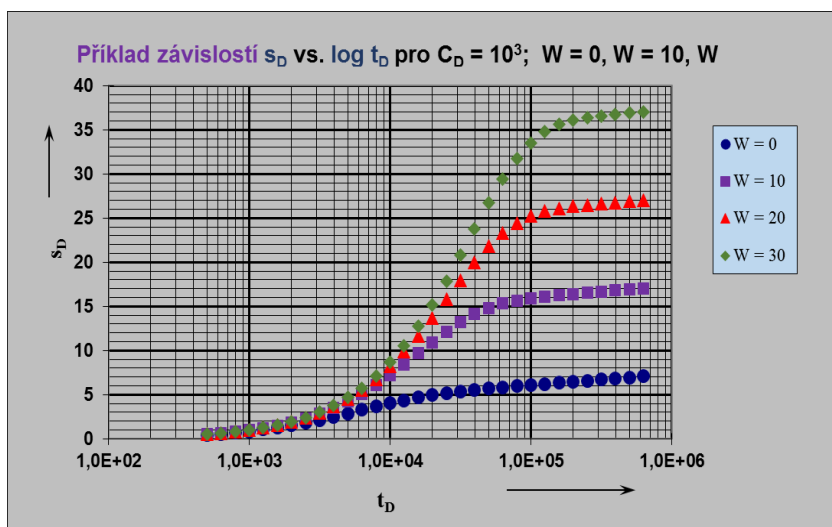
Obr. 4 Graf bezrozměrného snížení vs. \log bezrozměrného času

Bezrozměrný sklon první části semilogaritmického grafu čerpací zkoušky je (Pech, 2010)

$$i_{zD} = \frac{2\pi T i_z}{Q} \quad (24)$$

i_z – sklon prvního přímkového úseku krátkodobé čerpací zkoušky (-), který určíme z grafu s vs. $\log t$

Pro uvažovaný rozsah hodnot koeficientu dodatečných odporů, $W = 0 \dots 50$ a bezrozměrného koeficientu zásobnosti vrtu, $C_D = 10^2 \dots 10^7$, byly vypočteny hodnoty bezrozměrného snížení pomocí programu STEHF_1. Příklad vypočtených hodnot je uveden v obr. 5.



Obr. 5 Příklad vypočtených průběhů s_D vs. $\log t_D$ pro $C_D = 10^3$ a hodnoty $W = 0, 10, 20, 30$.

Z průběhů s_D vs. $\log t_D$ byly určeny sklony prvních přímkových úseků pro C_D ($10^2 - 10^7$) a W (0-50) (viz tabulka 1)

Tabulka 1 Hodnoty bezrozměrného sklonu prvního přímkového úseku v závislosti na W a C_D

C_D	$1,0E+02$	$5,0E+02$	$1,0E+03$	$5,0E+03$	$1,0E+04$	$5,0E+04$	$1,0E+05$	$5,0E+05$	$1,0E+06$	$5,0E+06$	$1,0E+07$
W			3		4	4	5	5	6	6	7
0	2,89	3,60	3,91	4,63	4,94	5,66	5,97	6,68	7,00	7,70	7,99
4	6,45	7,17	7,47	8,19	8,49	9,21	9,48	10,22	10,53	11,22	11,53
8	9,98	10,70	10,99	11,71	12,01	12,70	13,01	13,72	14,01	14,71	15,02
10	11,74	12,44	12,74	13,45	13,75	14,44	14,75	15,46	15,75	16,42	16,75
15	16,08	16,73	17,10	17,76	18,07	18,76	19,09	19,70	20,07	20,76	21,07
20	20,40	21,11	21,42	22,11	22,41	23,08	23,38	24,09	24,40	25,09	25,38
30	29,00	29,69	30,00	30,71	31,01	31,70	31,99	32,66	32,94	33,65	33,96
40	37,57	38,28	38,58	39,28	39,58	40,26	40,55	41,21	41,49	42,18	42,50
50	46,12	46,78	47,07	47,78	48,10	48,80	49,10	49,79	50,09	50,77	51,06

Vyneseme-li závislost bezrozměrného sklonu prvního přímkového úseku a logaritmu bezrozměrné zásobnosti vrtu, C_D pro koeficient dodatečných odporů, W (viz obr.6), dostáváme soustavu přímek, jejichž rovnice vyjádříme vztahem

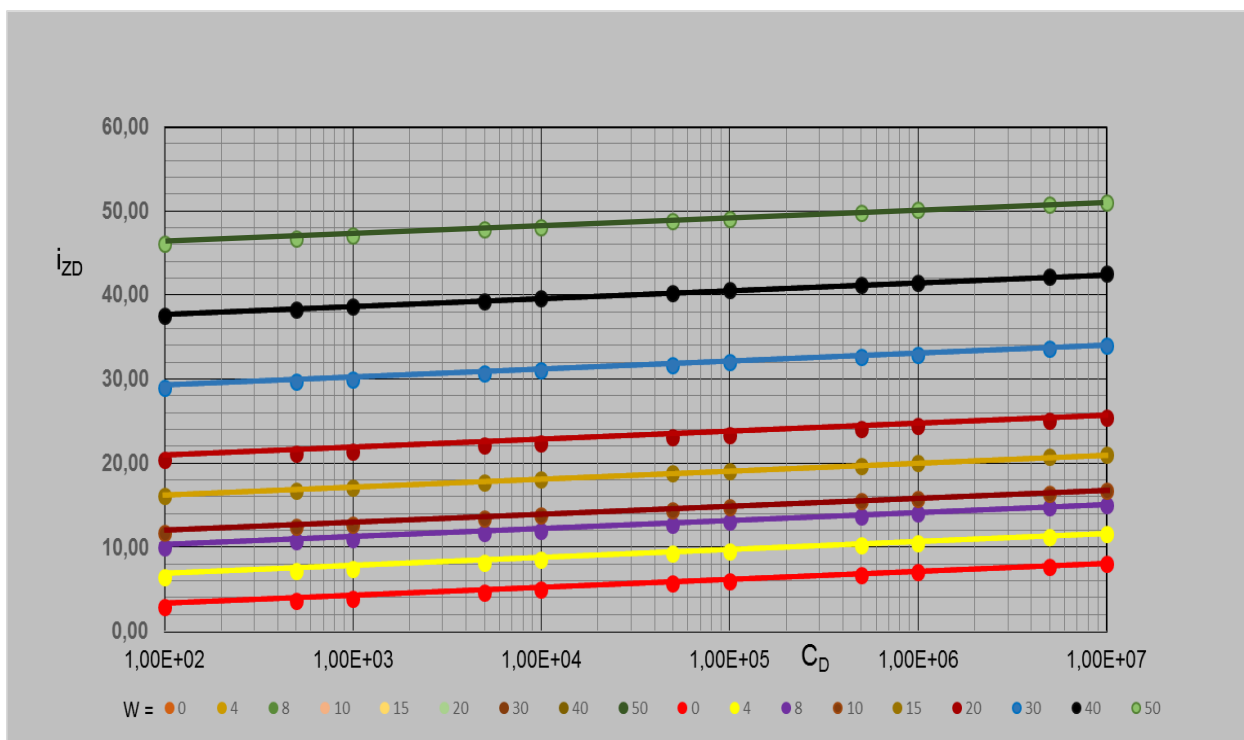
$$i_{ZD} = a_i \log C_D + b_i \quad (25)$$

kde a_i, b_i jsou parametry závislé na koeficientu dodatečných odporů, W .

Hodnoty a_i, b_i byly určeny pomocí metody nejmenších čtverců, tj. stanovíme hodnoty a_i, b_i tak, aby součet čtverců odchylek

$$\sum_{i=1}^n [i_{ZDi} - I_{ZDi}]^2 \quad (26)$$

mezi hodnotami určenými z řešení parciální diferenciální rovnice (6) a teoretickými hodnotami I_{ZD} byl minimální.



Obr. 6 Závislost i_{ZD} vs. $\log C_D$ (pro hodnoty $W = 0, 4, 8, \dots, 50$)

Další postup je rozebrán v Pech (2005). Výsledný vztah pro sklon prvního přímkového úseku, i_{ZD} v závislosti na C_D a W byl odvozen ve tvaru:

$$i_{ZD} = 0,86 W + 1,0127(\log C_D) + 1,0237 \quad (27)$$

kde po dosazení za i_{zD} (rov. (24)) dostáváme vztah

$$i_{zD} = \frac{Q}{2 \pi T i_z} (0,86W + 1,0127(\log C_D) + 1,0237) \quad (28)$$

a pro koeficient dodatečných odporů vztah

$$W = \frac{1}{0,86} \left(\frac{2 \pi T i_z}{Q} - 1,0127(\log C_D) - 1,0237 \right) \quad (29)$$

3.4. ZÁSADY PROVÁDĚNÍ KRÁTKODOBÉ ČERPACÍ ZKOUŠKY A POSTUP VYHODNOCENÍ

Krátkodobá zkouška prováděná pro vyhodnocení zásobnosti vrtu a koeficientu dodatečných odporů resp. dodatečného snížení musí splňovat následující požadavky:

- Z podrobné čerpací zkoušky (např. po zhotovení vrtu) je nezbytné určit koeficienty transmisivity a storativity pro zvodnělou vrstvu (předpoklad je, že změny těchto koeficientů v čase jsou zanedbatelné)
- Pro určení zásobnosti vrtu C musí být odečítání snížení v odčerpávaném vrtu v sekundovém intervalu (doporučuje se prvních 1500 s). Protože odečítání hladiny ve vrtu v sekundovém intervalu není možné, musí být zajištěno automatické snímání hladin. Po vynesení grafu (obr. 3) se určí z přímkového průběhu koeficient zásobnosti vrtu (rovnice (22)) a z rovnice (23) bezrozměrný koeficient zásobnosti vrtu C_D
- Následné sledování snížení v čase již může probíhat v 5 s intervalech až do ukončení krátkodobé čerpací zkoušky (trvání čerpací zkoušky se předpokládá 2 – 8 hodin)
- Vynese se grafická závislost snížení v odčerpávaném vrtu vs. logaritmus času (např. obr. 7)
- V grafu s vs. $\log t$ se určí sklon prvního přímkového úseku i_z
- Výpočtem z rovnice (29) se určí koeficient dodatečných odporů, W a snížení způsobené dodatečnými odpory ze vztahu (rov. (6))

$$s_w = \frac{Q}{2 \pi T} W \quad (30)$$

kde s_w – je snížení způsobené dodatečnými odpory a určuje rozdíl mezi hladinou vody ve vrtu a hladinou depresní křivky ve zvodnělé vrstvě, kde končí vliv dodatečných odporů

3.5 PRAKTICKÁ APLIKACE

Studna SV ve Veselí nad Lužnicí (Fousek, M. et al. 1982)

Jako ilustrativní příklad, dokumentující použití zde odvozených vztahů pro vyhodnocení hydraulických parametrů z počátečního úseku přítokové zkoušky (v tomto případě čerpací zkoušky), je použit na studně SV ve Veselí nad Lužnicí, kde byla provedena regenerace studny. Čerpací zkouška byla provedena před regenerací a po regeneraci. Čerpací zkoušky byly provedeny při konstantních odčerpávaných množstvích vody, za nestacionárního režimu proudění.

Studna SV je spouštěná studna o vnitřní světlosti 3 m a celkové hloubce 9,5 m. K dispozici pro vyhodnocení čerpací zkoušky byl pozorovací vrt P6 o vnitřní světlosti 50 mm. V Hampel, 1980 je popsán postup regeneračních prací. Bylo zjištěno, že vtokové otvory byly zaneseny pískem, jílem, oblázky a zarostlé inkrusty. Při regeneračním zásahu bylo provedeno mechanické čištění vtokových otvorů v plášti studny. Současně byla provedena tlaková regenerace okolí studny tlakovými rázy do zaplášťových vrtů, zhotovených speciálně k tomuto účelu.

Čerpací zkoušky byly provedeny tak, aby byly vyhodnotitelné metodami nestacionárního režimu proudění, tj. byl měřen časový průběh snížení ve studně S-V a v pozorovacím vrtu P6 při čerpání konstantního množství.

Čerpaná množství a délky trvání čerpacích zkoušek ve Veselí nad Lužnicí

Před regenerací:

$$Q = 0,00335 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad t = 180 \text{ min}$$

Po regeneraci:

$$Q = 0,0037 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad t = 240 \text{ min}$$

V následujících tabulkách 2 a 3 jsou uvedeny hodnoty snížení v závislosti na čase pro dané čerpací zkoušky, jejichž grafické znázornění je uvedeno v obr. 7 a 8. Vzhledem k tomu, že se jednalo o proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou, a pro vyhodnocení čerpacích zkoušek byly užity vztahy odvozené pro napjatou hladinu, byly hodnoty snížení s_v přepočítány na snížení s_c dle Jetel (1982)

K přepočtu na opravené snížení byl užit vztah

$$s_c = s_v - \frac{s_v^2}{2H}$$

metodou Jacobovy semilogaritmické aproximace byly z dlouhodobé čerpací zkoušky vyhodnoceny následující parametry (Fousek, M. et al. 1982)

- koeficient transmisivity $T = 0,0109 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
- koeficient storativity $S = 0,13$
- koeficient zásobnosti vrtu $C_D = 5,8$
- koeficient dodatečných odporů :
 - a) před regenerací $W = 43$
 - b) po regeneraci $W = 15$

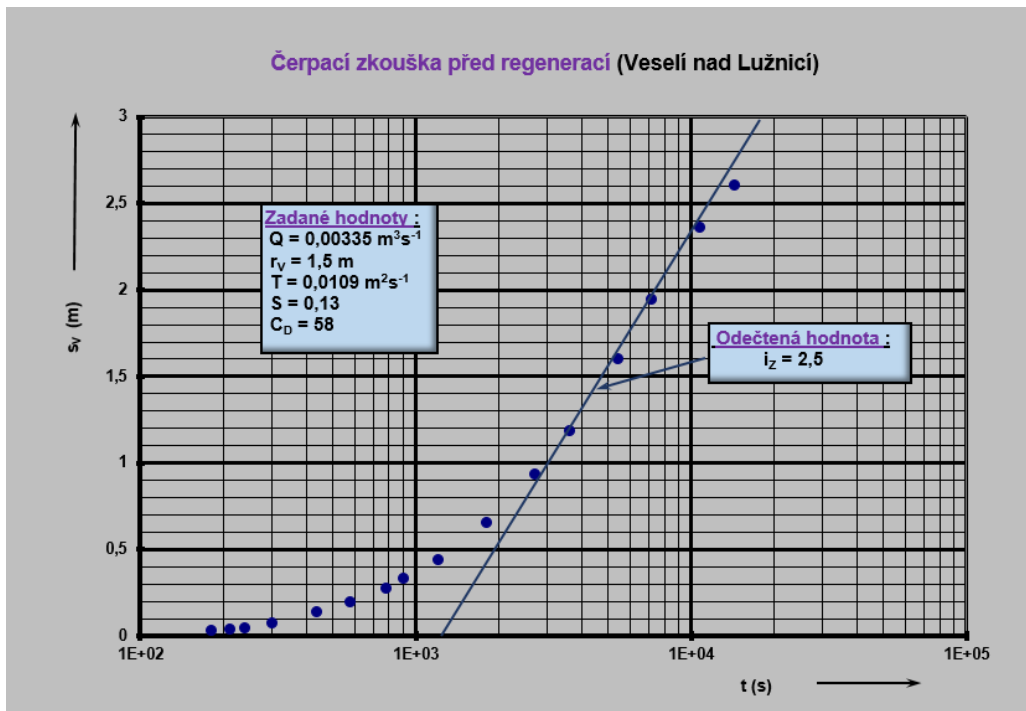
Tabulka 2 Čerpací zkouška před regenerací (studna SV - Veselí nad Lužnicí 1979)

č. měření	t (s)	s_v (m)	s_c (m)
1	180	0,03	0,03
2	210	0,04	0,04
3	240	0,05	0,05
4	300	0,08	0,08
5	435	0,14	0,14
6	575	0,195	0,195
7	780	0,28	0,28
8	900	0,034	0,335
9	1200	0,455	0,445
10	1800	0,68	0,655
11	2700	1,0	0,94
12	3600	1,28	1,19
13	5400	1,78	1,6
14	7200	2,24	1,95
15	10800	2,81	2,36

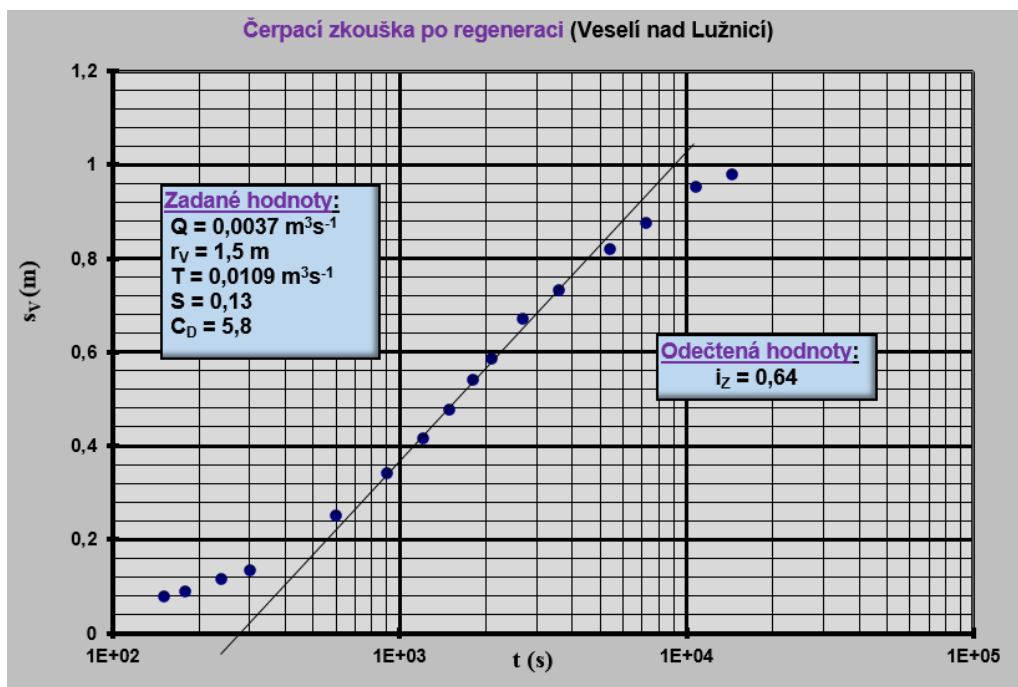
Tabulka 3 Čerpací zkouška po regeneraci (studna SV - Veselí nad Lužnicí 1979)

č. měření	t (s)	s _v (m)	s _c (m)
1	30	0,01	0,01
2	45	0,025	0,025
3	60	0,03	0,03
4	90	0,045	0,045
5	150	0,08	0,08
6	180	0,09	0,09
7	240	0,115	0,115
8	300	0,0135	0,135
9	600	0,25	0,25
10	900	0,345	0,34
11	1200	0,425	0,415
12	1500	0,49	0,475
13	1800	0,555	0,54
14	2100	0,605	0,585
15	2700	0,68	0,67
16	3600	0,765	0,73
17	5400	0,865	0,82
18	7200	0,925	0,875
19	10800	1,015	0,955
20	14400	1,04	0,98

Grafické vyjádření snížení vs. logaritmus času pro čerpací zkoušky před a po regeneraci



Obr. 7 Snížení, s_v vs. $\log t$ (Veselí nad Lužnicí, 1979) před regenerací



Obr. 8 Snížení, s_v vs. $\log t$ (Veselí nad Lužnicí, 1979) po regeneraci

Tabulka 4 Vyhodnocení koeficient dodatečných odporů W z čerpací zkoušky ve Veselí nad Lužnicí

	W z Jacobovy apr.	W z rovnice (29)	chyba (%)
před regenerací	43	49	14
po regeneraci	15	13	13

Z tabulky 4 a dalších aplikací na praktických případech reálných vrtů vyplývá, že nově odvozená metoda vyhodnocování hydrodynamických zkoušek z počátečních úseků čerpací zkoušky je s dostatečnou přesností využitelná v praxi.

4. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Při vyhodnocování skutečných vrtů byly v naftové oblasti navrženy postupy, jak určovat velikost dodatečných odporů např. pomocí metody typových křivek (Earlougher, 1977) nebo postupů (vztahů) odvozených z velkého počtu praktických čerpacích zkoušek (Raghavan, 1980) aj. V hydraulice podzemních vod se využívají metody určení koeficientu dodatečných odporů na vrtu jen velmi zřídka (používá se např. stupňovitá čerpací zkouška) nebo s využitím Jacobovy semilogaritmické aproximace.

Novost tohoto postupu spočívá v tom, že pro vyhodnocení parametrů charakterizujících stav resp. poškození vrtu lze využít poměrně jednoduchých vztahů (Pech, 2005, 2010) a tato vyhodnocení lze provádět v daných časových intervalech, aby provozovatelé jímácích vrtů získali obraz o vývoji stárnutí vrtů. Na základě těchto pravidelných vyhodnocení budou schopni určit vhodný okamžik regenerace vrtu. Z navrženého řešení a doporučeného správného provádění čerpací zkoušky bude možné využít k řešení nový software (vyvíjený v rámci projektu TAČR), který je již testován na praktických příkladech.

5. POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

Metodika najde uplatnění u firem, které se specializují na zhotovování vrtů, kdy při užití návodu uvedenému v této metodice budou schopni zhodnotit stav nově zhotoveného vrtu. Firmy využívající vrty k jímání podzemní vody budou moci rychle a efektivně vyhodnocovat stav vrtu v daném okamžiku, sledovat vývoj stárnutí (kolmatace) vrtu. Budou mít přehled o velikosti odčerpávaného množství vody a vývoji skoku na plášti vrtu vyvolaného dodatečnými odpory, které vznikají ve vrtu a jeho nejbližším okolí. Aplikování postupů uvedených v metodice povede i k úsporám elektrické energie při provádění čerpacích zkoušek, protože při vyhodnocování stavu vrtu bude stačit jen několikahodinové čerpání, které po dosažení prvního přímkového úseku čerpací zkoušky prováděné za neustáleného režimu umožní stanovit základní parametry kolmatace (v současné době bylo třeba délku čerpání přizpůsobit dosažení druhého přímkového úseku křivky snížení ve vrtu v závislosti na logaritmu času – vyhodnotitelnému Jacobovou semilogaritmickou aproximací). Nová metodika nalezne uplatnění rovněž u firem, které se zabývají regeneracemi vrtů. Těmto firmám odvozený postup vyhodnocení umožní stanovovat a dokladovat úspěšnost provedené zásahu na vrtu.

6. PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují Technologické agentuře ČR, která udělením grantu TA02021249 Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR umožnila dokončit dlouholetý výzkum, ověřit jeho výsledky na praktických případech a dovést řešení pro praktické využití

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Agarwal, R.G., Al - Hussainy, R. and Ramey, H.J. Jr. (1970). An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow : I. Analytical treatment. Trans. Soc. Petroleum Eng. AIME, 249,, 279-290. Trans AIME.

Bear, J. (1972). Dynamics of Fluids in porous media. American Elsevier. New York. 764 pp.

Bear, J. (1979). Hydraulics of ground water. New York.

- Batu, J.** (1999) Aquifer hydraulics: A comprehensive Guide to hydrogeologic data analysis, John Wiley & Sons, New York, 727p.
- Cooper, H. H. Jr. and Jacob, C. E.** (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Transactions, American Geophysical Union, 27, 526-534.
- Dudgeon, C.R. and Huyakorn, P.S.** (1976). Investigation of two-regime well flow. J. of the Hydr. Div., HY-9
- Earlougher, R.C.Jr. and Kersch, K.M.** (1974). Analysis of Short-Time Transient Test Data by Type-Curve Matching. JPT.
- Earlougher, R.C.Jr.** (1977). Advances in well test analysis. Monograph series. SPE of AIME. Dallas
- Ferris, J. G., Knowles, D. B., Brown, R. H., Stallman, R. W.** (1962). Theory of aquifer tests. U. S. Geological Survey Water Supply Paper 1536- E. 69-174.
- Fetter, C. W.** (1994). Applied Hydrogeology, third edition. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. New Jersey. 691 pp
- Freeze, R. A., and Cherry, J. A.** (1979) Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. New Jersey. 390 pp.
- Hantush, M. S.** (1966). Hydraulics of wells. Advances in Hydroscience, edited by Ven Te Chow. Academic Press. New York. 281-442 pp.
- Hálek, V., Švec, J.,** 1973. Hydraulika podzemní vody. Academia Praha
- Hurst, W.** (1953) Establishments of the skin effect and its impediment to fluid flow to a wellbore. Petr. Eng. Inst. 25. Dallas.
- Charbeneau, R. J.** (2006) Groundwater hydraulics and pollutant transport. Waveland Press,INC. Long Grove, Illinois. 593p
- Jacob, C.E.** (1946). Drawdown Test to Determine Effective Radius of Artesian Well. Proc. Amer Soc. Civ. Eng. Vol. 72, No. 5.
- Jetel, J.** (1982). Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech. ÚÚG Praha.
- Karanjac, J.** (1972). Well Losses Due to Reduced Formation Permeability. Ground Water. Vol. 8, No 4.
- Kresic, N.** (2006). Hydrogeology and groundwater modeling. CrC Press. 807p.
- Lee J.** (1982). Well Testing. SPE Textbook. Vol 1
- Mucha, I.** (1987). Hydraulika podzemních vod. SNTL Praha.

- Schwartz, F. W., Zhang, H.** (2003). Groundwater. John Wiley & sons, INC. pp.583.
- Stehfest, H.** (1970). Algorithm 368 numerical inversion of Laplace transforms D-5. Comm. of the ACM No 1.
- Strack, O.D.L.** (1989). Groundwater Mechanics. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- Theis C.V.** (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Am. Geophys. Union Trans., vol. 16, 519-524.
- Todd, D.K., Mays L. W.** (2005). Groundwater Hydrology. Third Ed. Wiley, New York.
- Walton, W.C. (1970). Groundwater Resource Evaluation. McGraw-Hill, New York.

8. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

- Fousek, M., Hampel, J., Hlaváček, V., Pech, P.** (1982). Regenerace spouštěné studny S 3 v prameništi Pracejovice. ZČ 86/82. Vodní zdroje, Praha.
- Hampel, J., Hlaváček, V., Pastuszek, F.** (1980). Provoz a údržba jímacích zařízení. RÚ TPRVH D9-3, Vodní zdroje Praha.
- Kruseman, G. P., de Ridder, N. A.** (1990). Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands. 377 pp
- Moench, A. F.** (1995). Convergent radial dispersion on a double-porosity aquifer with fracture skin – Analytical solution and application for a field experiment in fracture chalk. Water Resour. Res., 31, 1823-1835.
- Pech, P.** (2003). Determination of the skin factor in the early portion of an aquifer test. J. Environ. Hydrology, vol. 11, 1- 9.
- Pech, P.** (2010). Speciální případy hydrauliky podzemních vod. Monografie. ČZU a VÚV TGM. ISBN 978-80-87402-04-7
- Pech, P. Roub, R.** (2011). Stehf_1 . Autorizovaný software.
- Raghavan, R.** (1980). The Effect of Producing Time on Type Curve Analysis. JPT.
- Raghavan, R., Tongpenyai, I.** (1981). The Effect of Wellbore Storage and Skin on Interference Test Data. JPT.
- Rivera, J.G., Raghavan, R.** (1979). Analysis of Short-Time Pressure Data Dominated by Wellbore Storage and Skin. JPT.

Ramey, H. J. Jr. (1970). Short- time well test data interpretation in the presence of skin effect and wellbore storage. J. Pet. Tech. Jan., 97.

Van Everdingen, A. F. (1953) The skin effect and its influence on the productive capacity of a well. Trans AIME, vol. 198,171-176.

Wei Chun Chu, Garcia-Rivera, J. and Raghavan, R. (1980). Analysis of Interference Test Data Influenced by Wellbore Storage and Skin at the Flowing Well. JPT

Oponentské posudky Metodiky

„Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech“

Číslo projektu: TA02021249

Název projektu: Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR

1. Oponentský posudek

Datum: 18.4.2015

Zpracovatel: *RNDr. Josef V. Datel, Ph.D.*

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta – oddělení hydrogeologie

Albertov 6

128 43 Praha 2

Tel.: (+420) 221 951 558

E-mail: jvdatel@gmail.com

2. Oponentský posudek

Datum: 5.6.2015

Zpracovatel: *doc. Ing. Jan Šembera, Ph.D.*

Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Technická univerzita v Liberci

Studentská 2, 461 17 Liberec 1

Tel.: (+420) 485 353 005

E-mail: jan.sembera@tul.cz

Oponentský posudek metodiky

„Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech“

K oponentskému posouzení mi byla předložena odborná metodika, zpracovaná v rámci projektu TA02021249 „Udržitelné využívání podzemních vod“, kterou zpracoval řešitelský tým pod vedením prof. Ing. P. Pecha, CSc.

Metodika má 24 stran, text je logicky rozdělen do 7 kapitol. Metodika se věnuje postupu vyhodnocování čerpacích zkoušek na reálných vrtech za neustáleného režimu, s důrazem na počáteční úsek křivky čerpací zkoušky. Je třeba uvést, že ve většině provozních aplikací se počátečnímu úseku křivky čerpací zkoušky nevěnuje potřebná pozornost, i když charakterizuje existenci a umožňuje identifikovat dodatečné odpory na plášti vrtu (studny), případně vliv objemu vody ve vrtu na průběh počáteční fáze čerpací zkoušky.

Autoři správně uvádějí, že využití nového vyvinutého procesu je nejen při sofistikovaném vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek, ale i při vyhodnocování regenerace (čištění) vrtů, průběhu kolmatačních procesů na studnách apod. Jde tedy o širokou škálu možných aplikací v oblasti vodárenství a odběru podzemních vod pro různé účely.

Kapitola 2.1 popisuje problematiku tzv. ideálního vrtu, u kterého se neuvažují dodatečné odpory na plášti, ani vliv objemu vody. Stručně je zde uvedeno hydraulické řešení neustáleného proudění podzemní vody ke studni za pomoci klasického Theisova řešení se zavedením studňové funkce $W(u)$, případně využití Jacobova zjednodušení pro pozdější úseky křivky.

Kapitola 2.2 dostatečně názorně charakterizuje problematiku dodatečných odporů včetně procesů a jevů, které tyto odpory způsobují. Pro úplnost dodávám, že zmiňovaná „kalová kůra“ nesouvisí jen s rotačními způsoby vrtání, ale vzniká mnohdy i při metodách vrtání úderem, kdy často vzniká přirozený hustý výplach zahuštěním vodního výplachu jemnozrně rozrušenou hlinou.

Text dále podává výčet různých dodatečných odporů a ukazuje, že celková hodnota dodatečných odporů je součtem dílčích dodatečných odporů způsobených různými faktory. Plně souhlasím s tezí na straně 6, že v provozních podmínkách je velmi problematické separovat tyto jednotlivé dílčí odpory a stanovovat je zvlášť, a dodávám, že v podmínkách praxe to je i neúčelné.

Dále je charakterizována veličina storativita vrtu (je otázka, zda český výraz zásobnost vrtu by nebyl vhodnější z hlediska lepší názornosti jeho významu pro praktiky v terénu), a poté je podáno matematické analytické řešení proudění podzemní vody k reálnému vrtu.

Vzhledem k množství použitých fyzikálních veličin a symbolů bych uvítal pro přehlednost a srozumitelnost pro čtenáře zpracovat jejich jednotný seznam včetně jejich fyzikálního rozměru, a umístit ho na začátek metodiky, současně by se tím zajistila i jednotnost používaných symbolů v různých použitých výrazech (srv. rovnice 1, 2, 6 a 8).

Návrh nového postupu obsahuje kap. 2.3, která se soustřeďuje na počáteční úsek křivky čerpací zkoušky, která obsahuje vliv vlastního testovaného objektu a jeho nejbližšího okolí. Postup vyhodnocení je vhodně dokumentován grafy a tabulkami, a konkrétní metodický postup při vyhodnocení dat je popsán v bodech v kap. 2.4. Z bodů a) a b) vyplývá, že navržený nový způsob vyhodnocování čerpacích zkoušek předpokládá i specifický způsob navržené a vlastního provedení čerpací zkoušky, není tedy automaticky aplikovatelný zpětně, např. na čerpací zkoušky provedené v minulosti.

V textu není zdůrazněno (což doporučuji doplnit), že požadavek sekundového intervalu odečítání snížení hladiny po dobu 1500 s, není splnitelný ručním měřením, ale je nezbytné zajistit automatické snímání hladin v daném velmi krátkém intervalu.

Kapitola 2.5 pak obsahuje popis praktické aplikace navrženého postupu, což přispívá k jeho názornému objasnění, na příkladu regenerované studny ve Veselí nad Lužnicí.

Kapitola 3 se zabývá novostí navrženého metodického postupu. Mohu potvrdit, že daná metoda je v praxi dobře použitelná, a ve srovnání se stávajícími možnostmi využívá jednodušších (a tedy lépe použitelných) vztahů, a vyžaduje kratší dobu provádění čerpacích zkoušek. Navržený postup řešení je vhodný pro vývoj softwarového řešení, jak je uvedeno v závěru kap. 3.

Kapitola 4 uvádí možné uplatnění metodiky. Vrtné a čerpací firmy mohou danou metodiku využívat pro rychlé hodnocení stavu vrtu (během budování, oprav, čištění, regenerace, převystrojování atd.), mohou sledovat stárnutí vrtu, kolmataci, obecně změnu hydraulických parametrů vrtu (studny) v čase. Lze sledovat i velikost skinového efektu v závislosti na velikosti odběru a režimu čerpání, což umožní optimalizovat využití konkrétního odběrového objektu, s ohledem na udržitelné využití vodních zdrojů, ochranu využívaných útvarů podzemních vod a zajištění dlouhodobého dobrého technického stavu jímacích objektů.

V závěru textu je poměrně obsáhlý seznam použité literatury a dalších archívních publikovaných i nepublikovaných zdrojů, které s danou problematikou souvisejí, a které jsou dobře využitelné i pro další studium a následné práce na dalším výzkumu a vývoji v tomto směru.

Závěrem mohu konstatovat, že vznikla užitečná metodika, jako nástroj sofistikovaného vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek, která je využitelná v mnoha

směrech praktického hodnocení vodních zdrojů a odběrových objektů, nejen ve vodárenství, ale např. i v sanačních zásazích, kdy dlouhodobě čerpané sanační vrty velmi často trpí zhoršováním hydraulických vlastností specifickými parametry čerpané silně znečištěné vody. Navržené postupy umožňují za použití pokročilých metod interpretace hydraulických dat levnou a rychlou diagnostiku dodatečných odporů na vrtech vyplývající z jejich technického stavu, konstrukce, případně i nedostatků spojených s jejich využíváním.

Předloženou metodiku hodnotím velmi kladně, v posledních desetiletích úroveň vyhodnocování hydrodynamických zkoušek spíše stagnovala, a byly používány metody vyhodnocené do 70. - 80. let 20. století. Je proto dobře, že byly vyvinuty nové metody odpovídající současnému stavu poznání a monitorovací technice, která je dnes k dispozici.

Metodiku doporučuji po jazykové kontrole textu a drobných navržených formálních doplněních (viz výše) certifikovat a doporučovat pro co nejširší využití v praxi při geologických průzkumech a výzkumech, ve vodárenské praxi i sanačních pracích na znečištěných lokalitách.

V Praze 18. 4. 2015



RNDr. Josef V. Datel, Ph.D.

*Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta, oddělení hydrogeologie
Albertov 6, 128 43 Praha 2
jvdatel@gmail.com
mobil 604 381 243*

Odborný posudek Metodiky Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech

autor posudku: doc. Ing. Jan Šembera, Ph.D.

K posouzení mi byla předložena metodika ve formě souboru ve formátu pdf s názvem Metodika_2014.pdf o délce 1 490 755 bytů. V textu metodiky, který má rozsah 24 stran, není žádné vnočení. Metodika byla vytvořena v rámci řešení projektu č. TA02021249 „Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR“ a jejími autory jsou prof. Ing. Pavel Pech, CSc., doc. Ing. Petr Máca, Ph.D., doc. Ing. Michal Kuráž, Ph.D., RNDr. František Pastuszek a Ing. Daniel Kahuda.


Text Metodiky je členěn do pěti kapitol. První obsahuje formulaci cíle metodiky, druhá kapitola je stěžejní částí textu a je v ní popsáno stručně odvození samotné metodiky i formulace jejího praktického nasazení. Další kapitoly po řadě stručně popisují novost postupů, popis uplatnění metodiky a poděkování. Připojeny jsou dva seznamy literatury. Jednak odkazy do literatury použité v textu a jednak publikace autorů metodiky, které metodiku předcházely.

Formální úprava zprávy, zejména sazba a čitelnost vzorců, není na úrovni, kterou bych dokázal považovat za přiměřenou. Dle mého názoru si autoři metodiky zvolili zcela nevhodný textový editor pro text obsahující velké množství matematických vzorců. Touto připomínkou však nijak nezpochybňuji odbornou úroveň navržené metodiky. Text samotný je napsán stručně, avšak srozumitelně, podrobnost prezentovaných odvození je přiměřená účelu textu.

Popisovaná metodika je založena na využití dříve odvozených vztahů k získání kvantifikované znalosti dodatečných odporů jímacích vrtů relativně krátkou čerpací zkouškou. Větší část textu je proto věnována rešeršnímu shrnutí podstatných znalostí k odůvodnění stručně zformulovaného návrhu postupu čerpací zkoušky, sběru dat a jejich vyhodnocení ke kvantifikaci dodatečných odporů čerpacího vrtu. Navržený postup je v textu aplikován na příkladě vyhodnocení dvojice čerpacích zkoušek provedených na studni SV ve Veselí nad Lužnicí před a po regeneraci vrtu. Metodika umožnila v uvedeném konkrétním případě kvantifikovat koeficient dodatečných odporů s přesností na 14 %. Tento příklad věrohodně dokládá možnost uplatnění metodiky v praxi.

Tvrzení autorů uvedená v kapitole 4. Popis uplatnění metodiky považuji za věrohodná a tedy uvedenou metodiku vnímám jako prakticky dobře uplatnitelný výsledek výzkumu.

V Liberci dne 5. 6. 2015


Jan Šembera

č.j. 50 504/ENV/MŠ
 MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
 100 10 PRAHA 10, Vršovická 65

ežn

27

Protokol o schválení (certifikaci) metodiky na Ministerstvu životního prostředí

Číslo jednací	50 504/ENV/MŠ
Identifikace výzkumné aktivity (projekt, výzkumný záměr apod.),	TA020221249 Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR Organizace: Česká zemědělská univerzita v Praze Řešitelé: prof. Ing. Pavel Pech, CSc., doc. Ing. Petr Máca, Ph.D. doc. Ing. Michal Kuráž, Ph.D. Spoluřešitelé za Vodní zdroje a.s.: Ing. Daniel Kahuda RNDr. František Pastuszek Technologická agentura ČR
Poskytovatel dotace	
Číslo nebo jiné označení udělené certifikace přidělené vnějším certifikačním / akreditačním orgánem . Nevyplňovat u metodik, které schválila sekce MŽP	není
Název metodiky (maximální délka 254 znaků)	Metodika - Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech.
Interní identifikační označení metodiky (maximální délka 32 znaků)	zápoř (Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR)
Místo uložení metodiky (maximální délka 254 znaků)	Česká zemědělská univerzita v Praze Technologická agentura ČR Ministerstvo životního prostředí
Ekonomické parametry metodiky (ekonomické parametry charakterizující metodiku - např. roční zvýšení objemu výroby, zisku, export atd., resp. komentář k ekonomickým aspektům metodiky – maximální délka 254 znaků);	Využití navržených postupů hydrodynamických zkoušek (HZ) v Metodice – umožní radikálně zkrátit HZ, což povede k úsporám el. energie a provozních nákladů.
Sekce MŽP, která metodiku schválila a doporučila pro využití v praxi	Sekce ochrany přírody a krajiny, odbor geologie
Certifikační / akreditační orgán, který metodiku schválil a doporučil pro využití v praxi - úplný název a sídlo (případně stát) certifikačního / akreditačního orgánu, který metodiku certifikoval / akreditoval – Nevyplňovat u metodik, které schválila sekce MŽP	není
Datum schválení (certifikace / akreditace) metodiky	29.7.2015

Ad.

<p>Identifikace nejméně dvou nezávislých oponentních posudků (název, datum zpracování, zpracovatel)</p>	<p>Název: Oponentský posudek metodiky „Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech“. Datum: 18.4.2015 Zpracovatel: RNDr. Josef V. Datel, Ph.D. Univerzita Karlova v Praze Přírodovědecká fakulta – oddělení hydrogeologie</p> <p>Název: Odborný posudek Metodiky Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech Datum: 5.6.2015 Zpracovatel: doc. Ing. Jan Šembera, Ph.D. Ústav nových technologií a aplikované informatiky Technická univerzita v Liberci</p>
<p>Popis metodiky v českém jazyce včetně popisu novosti postupů (minimální délka 64 znaků, maximální délka 1016 znaků)</p>	<p>Na základě dlouholetého výzkumu byl v metodice navržen postup pro vyhodnocování čerpacích zkoušek na reálných vrtech za neustáleného režimu, kdy u reálných vrtů, oproti vrtům ideálním, musíme brát v úvahu v počátečním úseku čerpací zkoušky vliv dodatečných odporů vznikajících ve vlastním vrtu a jeho nejbližším okolí a vliv objemu vody ve vrtu na průběh snížení při čerpací zkoušce. Nově odvozené postupy lze využít pro vyhodnocení krátkodobých čerpacích zkoušek (v délce trvání cca 2- 8 hodin). Novost postupu spočívá ve vyhodnocování parametrů charakterizujících stav resp. poškození vrtu (koeficient dodatečných odporů, dodatečné snížení ve vrtu) s využitím poměrně jednoduchých vztahů odvozených řešiteli projektu TA02021249 TAČR a pokud jsou vyhodnocení prováděna v pravidelných intervalech, lze získat obraz o vývoji stárnutí vrtů s možností určit vhodný okamžik pro regeneraci a vyhodnocení jejího efektu.</p>
<p>Popis metodiky v anglickém jazyce včetně popisu novosti postupů (minimální délka 64 znaků, maximální délka 1016 znaků)</p>	<p>New procedure for evaluation of additional resistances (skin factor) and additional drawdown at a „real“ pumping well under unsteady flow is proposed in this Methodology. To apply this method, it is necessary that formation transmissivity, storativity, and wellbore radius be known or evaluated. The test must be conducted at a known constant flow rate. In this Methodology, a procedure for determination of the skin factor from pumping test data at a single well (no observation well is available) dominated by wellbore storage and the skin effect is presented. Skin factor, W and additional drawdown, is estimated from short-time transient test data (2-8 hours). Using the methodology procedure can watch the process of aging wells with the possibility to determine the appropriate moment for the regeneration of wells and evaluation of its effect.</p>

<p>Uživatel metodiky (název, adresa, jméno pracovníka, e-mail, telefon)</p>	<p>Zájemci o využití metodiky:</p> <p>SČVaK, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice Ing. Jakub Průša E-mail: jakub.prusa@scvk.cz Tel.: 606753876</p> <p>RMT VZ, a.s., Jindřicha Plachty 535/16, 150 00 Praha 5 – Smíchov Mgr. Petr Hosnedl, E-mail: hosnedl@rmtvz.cz Tel.: 724286388</p> <p>GIS-GEOINDUSTRY, s.r.o., Tleskačova 1329/16 323 00 Plzeň Ing. Helena Burešová, PhD. E-mail: buresova@geoindustry.cz Tel.: 725566653</p> <p>CHEMCOMEX, a.s. Praha, Elišky Přemyslovny 379, 156 00 Praha - Zbraslav Mgr. Jan Beneda E-mail: beneda@chemcomex.cz Tel.: 725959559</p> <p>VÚMOP, v.v.i. Žabovřeská 250, 156 27 Praha 5 – Zbraslav Ing. Tomáš Khel E-mail: khel@vumop.cz Tel.: 725975599</p>
<p>Datum uzavření smlouvy o využití výsledku s uživatelem metodiky</p>	<p><i>neuzavřena</i></p>
<p>Odborný garant – jméno / podpis / datum</p>	<p>RNDr. Jan Novák <i>J. Novák 21.7.2015</i></p>
<p>Vedoucí oddělení geofaktorů a geologických prací – jméno / podpis / datum</p>	<p>RNDr. Peter Pálenský <i>P. Pálenský 21.7.2015</i></p>
<p>Ředitel odboru geologie – jméno / podpis / datum</p>	<p>RNDr. Martin Holý <i>M. Holý 21.7.2015</i></p>
<p>Náměstek pro řízení sekce ochrany přírody a krajiny – jméno / podpis / datum</p>	<p>Ing. Vladimír Dolejský, Ph.D. <i>V. Dolejský 21.7.2015</i></p>

Příloha:

- 3 x Metodika v tištěné podobě se 2 oponentními posudky
- 3 x Metodika na CD , posudky, Protokol

OPRAVY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
100 10 PRAHA 10, Vršovická 65
27

Al.