



SLOVENSKÁ AGENTÚRA
ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA

HYDRODYNAMICKÉ SKÚŠKY

Seminár Environmentálne záťaže,
Štrbské Pleso, 21.3. a 22.3.2016

Ing. Jaromír Helma, PhD.
SAŽP, OAHŽPES

Chyby pri organizácií, realizácií a vyhodnotení HDS

1. nevhodné čerpadlo z hľadiska výkonu

- **malá odoberaná výdatnosť** (hladina podzemnej vody neklesala alebo klesala veľmi pomaly, takmer nemerateľne) alebo **veľká odoberaná výdatnosť** (rýchle vyčerpanie objemu vrtu a nedostatočný prítok do vrtu – nemožnosť merania hladiny podzemnej vody v prázdnom vrte),
- **nedostatočný výtlak čerpadla** – po poklese hladiny podzemnej vody a nutnosti zapustenia čerpadla do väčšej hĺbky nebolo možné realizovať čerpanie.

2. nevhodná organizácia skúšky

- **veľmi krátka skúška**, ktorú je veľmi problematické vyhodnotiť a navyše quázivypočítané hydraulické parametre nereprezentujú skúmané horninové prostredie (nepresný výpočet hydraulických parametrov (rádové rozdiely), resp. hydraulické parametre charakterizujú iba bezprostredné okolie vrtu,

Chyby pri organizácii, realizácii a vyhodnotení HDS

nevhodné situovanie pozorovacích vrtov, vo vzťahu k dĺžke čerpania – depresný kužel nedosiahol až po pozorovacie vrty – t.j. nebolo možné použiť merania v pozorovacích vrtoch na vyhodnotenie HDS (napr. Dupuit – Thiémová rovnica),

nevhodné situovanie pozorovacích vrtov vo vzťahu k zdroju znečistenia z hľadiska predpokladaného smeru prúdenia podzemnej vody.

Poznámka: Objektívnym problémom je v prípade EZ, aby sme čerpaním nevhodne neovplyvnili šírenie sa znečistenia podzemnej vody (možno by bolo vhodné za určitých okolností, spojiť HDS so sanačným čerpaním).

Problém s vypúšťaním čerpanej vody, tak aby neovplyvnili priebeh HDS, ale aby aj neznečistili prostredie.

Chyby pri organizácii, realizácii a vyhodnotení HDS

3. nevhodný spôsob vyhodnotenia HDS

– použitie Dupuit-Thiemovej rovnice pri vyhodnotení na základe údajov iba z čerpaného (odoberaného) vrtu. Rovnica je vhodná iba na použitie, keď máme k dispozícii údaje o meraní hladiny podzemnej vody z 2 pozorovacích vrtov umiestnených na priamke od odberového vrtu!!! V žiadnom prípade sa nesmú do výpočtovej rovnice dosadzovať hodnoty úrovne hladiny podzemnej vody z čerpaného vrtu!!!

- na základe údajov z príliš krátkej čerpacej skúšky, kedy nebol dosiahnutý reprezentatívny úsek krivky $s = f(\log t)$ (zníženie hladiny ako funkcia logaritmu času) pre správne vyhodnotenie a výpočet hydraulických parametrov metódou Jacoba. Prejavilo sa to následne aj v stúpacej skúške.

Aj pri dostatočne dlhej HDS je spoľahlivejšie (menej zaťažené chybami) použiť pre výpočet radšej údaje zo stúpacej skúšky ako z čerpacej časti HDS!

Chyby pri organizácii, realizácii a vyhodnotení HDS

3. nevhodný spôsob vyhodnotenia HDS (pokračovanie)

– použitie empirických vzorcov, ktoré nemajú reálny matematicko-fyzikálny základ, ale boli odvodené pre konkrétne prostredie v konkrétnej oblasti, t.j. nie sú všeobecne uplatniteľné – treba citlivo zvážiť ich použitie (napr. výpočet dosahu depresie empirickými vzorcami -),

Kusakinov empirický vzorec

$$r_d = 650 \sqrt{Q \cdot s}$$

správny vzorec

$$r_d = 1,5 \sqrt{a \cdot t} = 1,5 \sqrt{\frac{T}{S} \cdot t}$$

- často chýbali grafické interpretácie výsledkov HDS (priebehy čerpacej a stúpajúcej skúšky, ale aj meraných základných parametrov EC, pH, Eh, O₂, teplota vody), samozrejme následne aj textové interpretácie (zatriedenie do klasifikácií priepustnosti a prietočnosti, porovnanie s regionálnymi parametrami, interpretácie priebehu HDS a interpretácia výsledkov terénnych parametrov meraných počas HDS,

Chyby pri organizácií, realizácií a vyhodnotení HDS

3. nevhodný spôsob vyhodnotenia HDS (pokračovanie)

- použitie programu (software) bolo v niektorých prípadoch bez racionálneho príspevku riešiteľa (systém: vlož data – „vypľuj data“ – veríme – hotovo). Napr. program (zvyčajne) nevie, ktorú časť krivky má považovať za reprezentatívnu a že v niektorých prípadoch skúška bola zrejme príliš krátka a reprezentatívny úsek možno ani nebol dosiahnutý,
- chýbalo štatistické vyhodnotenie (ak sa jednalo o súbor viacerých vrtov, skúšok).
- Chybné označenie k (m/s) – koeficientu filtrácie, ktorý si riešitelia mýlili s K (m²) – koeficientom priepustnosti

$$k = \frac{K \rho g}{\mu}$$

Poznámka: Ak pri výpočte hydraulických parametrov vieme o určitých zjednodušeníach, schématicizovaní, nepresnostiach, mali by sme ich uviesť v neistotách v AR. Napr. pri výpočte hydraulických parametrov metódou Jacoba sa dá dokonca kvantifikovať tzv. chyba z objemovej kapacity vrtu.

Príprava a organizácia HDS

1. Archívna excerpčia HG pomerov:

-hydraulických parametrov horninového prostredia skúmaného územia (koeficient prietochnosti T , koeficient filtrácie k , hydraulický gradient I , koeficient zásobnosti S),

- hrúbky hydrogeologického kolektora M (zvodnenca), izolátora, hĺbky hladiny podzemnej vody,

- režimu podzemnej vody, okrajových podmienok a pod.

(Geofond - správy, Geologická knižnica – monografie a odborné články, napr. časopisy Podzemná voda..., GeolInfoPortál SGÚDS - HG mapy, GIB-GES...).

Príprava a organizácia HDS

2. Výber miest pre situovanie HG vrtov

s ohľadom na predpokladané smery prúdenia podzemnej vody, s ohľadom na zdroj znečistenia a možné šírenie znečistenia (v zmysle smernice MZP SR 1/2015-7), ale aj s ohľadom na dosah depresného kužeľa (orientačný výpočet r_d na základe údajov získaných archívnuou excerpciou).

Napr. ak uvažujeme z HDS, ktorej súčasťou budú okrem odberového vrtu aj pozorovacie vrty (PV) musíme zosúladiť dĺžku HDS a vzdialenosť PV, aby mala zmysel realizácia PV a meranie v PV (aby tam dosiahol depresný kužeľ) – aby sa to dalo vyhodnotiť.

Príprava a organizácia HDS

3. Výber metódy (spôsobu) HDS

podľa dĺžky (krátkodobá, ..., poloprevádzková), odberová (čerpacia) s konštantnou výdatnosťou (konšt. Q), s konštantným znížením hladiny podzemnej vody (konšt. S), následná stúpacia skúška, na viac depresíí (etážová), prípadne môžu byť skúšky aj tlakové, nalievacie...

Asi najbežnejšou skúškou je krátkodobá s konšt Q , príp. na 1 - 3 depresie. V rámci územia Slovenska sa často realizujú HDS najmä v kotlinách, kde sú zvyčajne hodnoty T a k vyššie ako v horninových masívoch. Často sa jedná o fluvialne sedimenty kvartéru (dnové, terasové), prípadne terciérne sedimenty. Najvyššie hodnoty T a k sa rádovo pohybujú okolo 10^{-3} . Bežne rádovo 10^{-4} . Napriek tomu alebo aj kvôli tomu HDS skúšky by nemali byť kratšie ako 24 hodín čerpacia (odberová) + cca 8 až 12 hodín stúpacia časť.

Príprava a organizácia HDS

4. Príprava podkladov pre realizáciu meraní počas HDS:

- príprava tlačív - navrhnuť dostatočnú dĺžku HDS (odberovej aj stúpacej časti), navrhnuť vhodnú frekvenciu meraní, dostatočnú hustotu meraní najmä na začiatku odberovej skúšky, ako aj stúpacej skúšky).

Tlačivo pre odberový vrt, pre pozorovacie vrty, v tlačive atribúty pre meranie Q (výdatnosti), hladiny podzemnej vody, ostatných parametrov (EC, pH, Eh, teplotu vody, O₂).

Frekvencia meraní: na začiatku niekoľkokrát – napr. 10 x po 1 minúte, 10 x po 2 minútach, 10 x po 5 minútach, 10 x po 10 minútach...po 30 minútach, po hodine...).

Príprava a organizácia HDS

5. Príprava technického vybavenia pre realizáciu HDS:

- príprava vhodného čerpadla (čerpadiel) – na základe odhadu hydraulických parametrov odhadnúť výdatnosť Q , na základe hĺbky hladiny podzemnej vody navrhnuť čerpadlo, ktoré je schopné „vytlačiť“ podzemnú vodu na povrch.
- príprava hladinomerov, prostriedkov na meranie výdatnosti, prenosných meracích prístrojov (EC, pH, Eh, teplotu vody, O_2), prípadne meračov voľnej fázy ropných látok.

Vyhodnotenie HDS

1. Dupuit - Thiemova rovnica

Niekedy aj v odbornej literatúre sa uvádzajú jej nesprávne tvary. Nesprávnou aplikáciou predmetnej rovnice sa môžu vypočítané hodnoty hydraulických parametrov rádovo líšiť od reálnych, správnym postupom stanovených hydraulických parametrov.

$$1. \quad Q = \frac{2,73 \cdot T \cdot (s_1 - s_2)}{\log r_2 - \log r_1} \qquad 2. \quad Q = \frac{2,73 \cdot T \cdot (s_1 - s_2)}{\log \frac{r_2}{r_1}}$$

Správna aplikácia predmetnej rovnice je 1. resp. 2. a jej úpravou dostaneme rovnicu 3. alebo 4. (napr. Jetel, 1982). Vstupné hodnoty sú hodnoty zníženia hladiny podzemnej vody v pozorovacích vrtoch (s_1 a s_2) usporiadaných na priamke v určitej vzdialenosti od čerpaného vrtu (r_1 a r_2).

správny vzorec

správny, ale ťažko použiteľný (nepoznáme r_d , r_{ev})

nesprávny vzorec

$$3. \quad T = 0,3663 \cdot \frac{Q \cdot \log \frac{r_2}{r_1}}{s_1 - s_2} \qquad 4. \quad T = 0,3663 \cdot \frac{Q \cdot \log \frac{r_d}{r_{ev}}}{s_v} \qquad 5. \quad T = 0,3663 \cdot \frac{Q \cdot \log \frac{r_d}{r_v}}{s_v}$$

Vyhodnotenie HDS

2. Dupuit - Thiemova rovnica (pokračovanie):

T.j. daná rovnica je vhodná v prípade, že okrem čerpaceho vrtu máme aj 2 pozorovacie vrty, kde meriame zníženia hladiny podzemnej vody (pokiaľ k nim dosiahla depresia).

V prípade, že by sme chceli použiť hodnoty z čerpaného vrtu, dopustili by sme sa chyby. Ak by sme aj poznali dosah depresného kužela, resp. by sme ho vedeli správne stanoviť (čo sa napr. Kusakimovom empirickom vzorci vhodnom možno pre určité prostredie nedá stopercentne povedať), museli by sme spolu s dosahom depresie (r_d) dosadiť do vzorca tzv. hydraulický ekvivalentný polomer vrtu (r_{ev}), ktorý je menší ako je skutočný polomer vrtu a nepoznáme ho, resp. (ak by sme dosadili reálny polomer vrtu) treba potom dosadiť tzv. teoretickú hladinu zníženia vo vrte (s_t), ktorá je menšia ako reálna, nakoľko nie je ovplyvnená hladinovým skokom kvôli nevyplnenému priestoru vrtu a tiež jej hodnotu presne nepoznáme.

Vyššie uvedený tvar rovnice (na predchádzajúcom liste) vychádza z tzv. Theisových zjednodušujúcich predpokladov odvodených pre **zvodeň s napätou hladinou**.

Vyhodnotenie HDS

3. Dupuit - Thiemova rovnica (pokračovanie):

pre ustálené prúdenie vo zvodnenci s voľnou hladinou bola odvodená Dupuit - Thiemova rovnica s použitím Jacobovej korekcie pre voľnú hladinu.

Vo zvodnenci s voľnou hladinou dochádza so znížením hladiny podzemnej vody v dôsledku čerpania aj ku zníženiu hrúbky zvodne.

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

Dupuit - Thiemova rovnica po odvodení:

$$Q = 1,36 \cdot \frac{k \cdot h_2^2 - h_1^2}{\log r_2 - \log r_1}$$

Vyhodnotenie HDS

4. Jacobova logaritmická aproximácia Theisovej studňovej funkcie (priamková transformácia na základe Jacobovej aproximácie), t.j. metóda Jacoba:

Výhodou je použitie aj v prípade HDS bez pozorovacích vrtov. Dá sa použiť v prípade napätej aj voľnej hladiny. Vyhodnocuje sa jednoduchšie z hľadiska dodatočných odporov (dajú sa ľahšie identifikovať deformácie počiatočných aj konečných úsekov kriviek, ale aj iné, napr. sa dá kvantifikovať chyba π z objemovej kapacity vrtu) ako pri použití štandardných typových kriviek Theisa.

Dá sa vyhodnocovať z meraní počas čerpacej aj stúpacej časti HDS, ale vo všeobecnosti za spoľahlivejšie a presnejšie sa považuje vyhodnotenie zo stúpacej časti HDS. Napríklad je možné urobiť vyhodnotenie stúpacej skúšky aj pri nekonštantnom odbere.

Vyhodnotenie HDS

4. Jacobova metóda (pokračovanie):

Dôležitým predpokladom pre správne vyhodnotenie je dostatočná dĺžka čerpacej a stúpacej časti skúšky a dostatočná frekvencia meraní. S dostatočnou dĺžkou súvisí to, že aby platili podmienky (predpoklady) platnosti zjednodušenej pôvodnej rovnice Theisa mala by byť HDS taká dlhá, aby sa vytvoril tzv. kváziustálený stav neustáleného prúdenia v skúmanom území. Čím väčšie je územie (skúmané územie ovplyvnené čerpaním), tým dlhší je čas skúšky a menšia je chyba (odchýlka) logaritmickej aproximácie od Theisovej studňovej funkcie $W(u)$.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u) \quad W(u) = \frac{1}{u} - 0,577 = \ln\left(\frac{2,246Tt}{S \cdot r^2}\right)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

dôležitý odvodený vzorec $T = \frac{0,183Q}{i}$

Vyhodnotenie HDS

4. Jacobova metóda (pokračovanie):

Odchýlka logaritmickéj aproximácie od Theisovej studňovej funkcie $W(u)$ je približne 10 % pri $u = 0,15$, 5 % pri $u = 0,10$, 0,25 % pri $u = 0,01$.

Dôležitá podmienka: vplyv objemovej kapacity vrtnu musí byť zanedbateľný – t.j. objem vody vo vrte musí byť rádovo nižší ako celkový objem odčerpanej vody.

Smernica priamky z grafu, reprezentatívny úsek krivky: $i = \frac{\Delta s}{\Delta \log t}$

Jednoduchý výpočet koeficientu prietochnosti: $T = \frac{0,183Q}{i}$

Vyhodnotenie HDS

Chyba π (z objemovej kapacity vrtu) sa

počíta v % a vstupné parametre sú h_{max} – maximálna hĺbka hladiny podzemnej vody počas hydrodynamickej skúšky, $h(t)$ - hĺbka hladiny podzemnej vody v čase t (v počiatočnom resp. konečnom bode posudzovaného úseku krivky metódou Jacoba), Q_0 – odoberané (čerpané) množstvo vody z vrtu, t – čas (v počiatočnom resp. konečnom bode posudzovaného úseku krivky metódou Jacoba).

$$chyba \pi = 100 * \frac{3,14 \cdot r^2 (h_{max} - h(t))}{Q_0 \cdot t}$$

Poznámka: Namiesto 3,14 by malo byť vo vzorci Ludolfovo číslo π (Pí), ale aby sa to nemýlilo s chybou, ktorá má rovnaké označenie, preto je vo vzorci hodnota 3,14.

Dôležitá podmienka: vplyv objemovej kapacity vrtu musí byť zanedbateľný – t.j. objem vody vo vrte musí byť rádovo nižší ako celkový objem odčerpanej vody.

Vyhodnotenie HDS

4. Jacobova metóda (pokračovanie) – stúpacia skúška:

Pri vyhodnocovaní stúpacej skúšky sa musí použiť sklon i vypočítaný z údajov reprezentatívneho úseku krivky (grafu), kde namiesto času čerpacej skúšky (od začiatku čerpania po daný bod) sa použije tzv. bezrozmerný čas, kde t_c je čas čerpacej skúšky (počas čerpania) a t_{st} je čas od začiatku stúpacej časti HDS.

bezrozmerný čas $t' = t_{st} / (t_c + t_{st})$

$$i = \frac{\Delta s}{\Delta \log t'}$$

$$T = \frac{0,183Q}{i}$$

Vyhodnotenie HDS

4. Výpočet striktne hydraulických parametrov T a k pomocou aproximatívnych logaritmických parametrov Y , Z a prepočtovej diferencie d :

Relatívne rýchly výpočet slúžiaci najmä na porovnávanie regionálnych hodnôt parametrov T a k , na unifikáciu údajov z rôzne realizovaných HDS, s rôznym spôsobom vyhodnotenia.

Vhodný však aj na rýchlu, jednoduchú orientačnú kontrolu vypočítaných hodnôt T a k z HDS inými metódami. Základom je špecifická (merná) výdatnosť $q_1 = Q/s$ (odoberaná výdatnosť / zníženie hladiny podzemnej vody).

$$Y = \log(10^6 q_1) = \log q_1 + 6$$

$$Z_L = \log\left(10^6 \frac{q^o}{L}\right) = \log\left(\frac{q^o}{L}\right) + 6 = Y - \log L$$

$$T = \text{antilog}(Y - 9 + d) \quad \text{to isté} \quad T = 10^{(Y-9+d)}$$

$$k = \text{antilog}(Z_L - 9 + d)$$

ĎAKUJEM ZA POZORNOST