

**Metody hodnocení
hydrodynamických zkoušek na
jímácích vrtech**

Disertační práce

Školitel: prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Oponenti práce: doc. Ing. Michal Kuráž, PhD.
(Česká zemědělská univerzita v Praze)

doc. RNDr. Zbyněk Hrkal, PhD.
(Univerzita Karlova, Praha)

RNDr. Josef Vojtěch Datel, PhD.
(Univerzita Karlova, Praha)

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Praha, 2022

Metody hodnocení hydrodynamických zkoušek na jímacích vrtech

Daniel Kahuda

Disertační práce

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: *Metody hodnocení hydrodynamických zkoušek na jímacích vrtech* vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele.

V Praze dne

Podpis autora:

Poděkování

Zvláštní poděkování patří především školiteli prof. Ing. Pavlu Pechovi, CSc. za odborné vedení a všeobecnou podporu, dále kolegům Ing. Václavu Ficajovi a Ing. Janu Kukačkovi za plodnou spolupráci, a rovněž firmě VODNÍ ZDROJE, a.s. za možnost sdílení použitých dat. Děkuji všem ostatním kolegyním a kolegům, se kterými jsem měl tu čest spolupracovat a být v kontaktu v průběhu celého doktorského studia.

Experimentální část obsažená v této disertační práci byla spolufinancována z následujících výzkumných projektů:

TAČR – TH02030421 ULTRA – Zařízení pro regeneraci vodárenských jímacích vrtů na principu ultrazvuku

TAČR – SS01020224 – Malá regenerační souprava MARS (2020-2023)

Abstract

The main objective of the presented thesis was to develop the theme of evaluation of short-term hydrodynamic pumping test on production wells (i.e. drilled wells), especially in the water supply practice of groundwater pumping for drinking purposes. The medium of solution is the non-steady groundwater flow into the so-called "real" well and the object of research are the additional resistances on the well casing including the influence of the intrinsic volume of these objects. As a tool for the description of the non-steady radial flow, the solution of the partial differential equation in the Laplace domain is used, where the numerical inversion of the Laplace transform is applied for the solution in real space using the Stehfest 368 algorithm. The source of data for the study of this problem was a number of field hydrodynamic tests carried out on the pumping wells operated by waterworks companies: Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., RAVOS Rakovník, a.s. and Středočeské vodárny, a.s.

In the course of the solution, attention was paid mainly to the well rehabilitation (regeneration) and their influence on the assessed hydraulic parameters. In connection with the running research projects, intensive work was also carried out on the description and testing of well rehabilitation techniques, especially the ultrasonic well rehabilitation technology. These methods were developed to reduce well clogging (i.e. to reduce additional resistivity) and therefore, from an operational point of view, to maintain initial production capacity. The ultrasonic method was introduced in prototype form and successfully tested on several pumping wells during the course of this work. The present dissertation is a compilation of 3 published and peer-reviewed scientific articles.

Abstrakt

Hlavním cílem předkládané disertační práce byl rozvoj problematiky vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na jímacích vrtech (tj. vrtaných studních) a to zejména ve vodárenskou praxi jímání podzemní vody pro pitné účely. Prostředím řešení je nestacionární proudění podzemní vody do tzv. „skutečného“ vrtu a předmětem výzkumu jsou dodatečné odpory na plášti vrtu vč. vlivu vlastního objemu těchto objektů. Coby nástroj popisu nestacionárního radiálního proudění je použito řešení parciální diferenciální rovnice v Laplaceově oblasti, kdy pro řešení v reálném prostoru je aplikována numerická inverze Laplaceovy transformace s využitím algoritmu Stehfest 368. Zdrojem dat pro studium této problematiky bylo množství provedených terénních hydrodynamických zkoušek na jímacích vrtech provozovaných společnostmi Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., RAVOS Rakovník, a.s. a Středočeské vodárny, a.s.

V průběhu řešení byla pozornost věnována především regeneracím vrtů a jejich vlivu právě na posuzované hydraulické parametry. V souvislosti s řešenými výzkumnými projekty byla dále prováděna intenzivní činnost na popisu a testování technologií regenerací vrtů, a to zejména technologie regenerace vrtů ultrazvukem. Jedná se o metody vyvinuté za účelem snížení kolmatace pláště a obsypu vrtů (tj. snížení dodatečných odporů) a z provozního hlediska tedy pro udržování výchozí jímací kapacity. Ultrazvuková metoda byla v průběhu řešení této práce představena ve formě prototypu a úspěšně otestována na více jímacích objektech podzemní vody.

Předkládaná disertační práce je kompilátem 3 publikovaných a recenzovaných vědeckých článků.

Kahuda, D.; Pech, P.: A New Method for the Evaluation of Well Rehabilitation from the Early Portion of a Pumping Test, Czech University of Life Sciences Prague, Water 12 (3), 744 (2020): <https://doi.org/10.3390/w12030744>

Ficaj, V.; Pech, P.; Kahuda, D.: Software for Evaluating Pumping Tests on Real Wells, Czech University of Life Sciences Prague, Adapted from Applied Sciences. 2021; 11(7):3182. <https://doi.org/10.3390/app11073182>

Kahuda, D.; Pech, P.; Ficaj, V.; Pechová, H.: Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test, Czech University of Life Sciences Prague, Coatings. 2021; 11(10):1250. <https://doi.org/10.3390/coatings11101250>

Obsah

Kapitola I	Obecný úvod	7
Kapitola II	A New Method for the Evaluation of Well Rehabilitation from the Early Portion of a Pumping Test	29
Kapitola III	Software for Evaluating Pumping Tests on Real Wells	62
Kapitola IV	Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of its Effectiveness from the Pumping Test	88
Kapitola V	Shrnutí	124
Bibliografie		141
Curriculum vitae & Seznam publikací		152

Kapitola I

Obecný úvod

Horninové prostředí jako propustné (porézní) médium

K proudění podzemní vody dochází v propustných partiích horninového prostředí, a to přímo úměrně ke gradientu tlakové výšky a míře jeho propustnosti. V tomto smyslu proudění předpokládá vlastnost dotčené horniny jako porézního prostředí (rovněž nazýváno průlinové prostředí) nebo existenci puklin, které v jinak nepropustném prostředí tvoří jednotlivé polohy s porézními vlastnostmi, popř. přímo otevřené průtočné profily (např. krasové). V praxi se lze obvykle setkat s kombinací výše uvedeného při různé míře (ne)homogenity a (an)izotropie, typická je existence preferenčních cest, kdy se pukliny s vyšší propustností nacházejí i v kolektorech podzemní vody jinak rovněž porézně propustných.

Definice základních hydraulických parametrů

Pórovitost

Pórovitostí $n[-]$ je definován procentuální podíl prázdného prostoru v horninovém prostředí. V případě podzemní vody se jedná specificky o podíl objemu pórů k celkovému objemu horninového prostředí. (Freeze & Cherry, 1979):

$$n = \frac{V_P}{V_C} \quad (I - 1)$$

Jelikož pouze část zvodnělých pórů je propojena k účasti na proudění podzemní vody, je definována ještě efektivní pórovitost $n_{ef}[-]$, která tvoří příslušnou část pórovitosti celkové.

$$n_{ef} = \frac{V_{pef}}{V_p} \quad (I - 2)$$

Propustnost

$k_p[L^2]$ je schopnost porézního materiálu propouštět tekutiny. Lze ji definovat na základě Darcyho zákona, v jehož teoretickém odvození je obsažena v proporcionální konstantě, která vztahuje rychlost proudění a fyzikální vlastnosti tekutiny k rozdílu tlakových výšek v porézním prostředí

$$k_p = v * \mu \frac{\Delta P}{\Delta x} = v * \mu \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (I - 3)$$

Kde: μ – dynamická viskozita tekutiny [P*T], ΔP – gradient tlakové výšky [L], Δx – rozdíl vzdálenost [L]

Propustnost k_p může být rovněž definována ze vztahu k hydraulické vodivosti, kde reprezentuje vlastnost porézního prostředí propouštět tekutiny bez ohledu na jejich fyzikální vlastnosti (Pech, 2010)

$$k_p = \frac{n_{ef} \cdot D^2}{32} \quad (I - 4)$$

Kde: n_{ef} – efektivní pórovitost [-], D – průměr pórů [L]

Na základě hydraulické vodivosti lze stanovit přímo hodnotu propustnosti, kterou je rovněž možné stanovit empiricky na základě rovnice (Holub, 2019):

$$k_p = C * d_{10}^2 \quad (I - 5)$$

kde: C – konstanta orientace efektivních pórů [-] (45 jílový písek až 140 písek), d – průměrný nebo efektivní průměr pórů [L]

Konduktivita

K [L/T] je označována rovněž jako „hydraulická vodivost“, nebo koeficient filtrace. Parametr popisuje schopnost porézního materiálu propouštět tekutinu (obvykle vodu) v závislosti na propustnosti prostředí, stupně nasycení prostředí a rovněž na hustotě a viskozitě tekutiny.

$$K = \frac{k_p * \rho * g}{\mu} \quad (I - 6)$$

Storativita

Storativita (nebo koeficient storativity) je definována jako objem vody uvolněný z jednotkové plochy zvodnělého porézního prostředí při jednotkovém poklesu hydraulické tlakové výšky. V praxi tento parametr popisuje schopnost prostředí přijímat či uvolňovat (gravitační) zásobu vody. Je bezrozměrná a vždy $S > 0$.

$$S = \frac{dV_w}{dH} \frac{1}{A} = S_s b + S_y \quad (I - 7)$$

kde: V_w – uvolněný objem vody ze zásoby [L^3], H – tlaková výška (piezometrická) [L], A – plocha [L^2], S_s – specifická storativita, b – mocnost porézního prostředí [L], S_y – specifická vydatnost

V prostředí s napjatou hladinou dochází k uvolnění objemu vody (při poklesu piezometrické tlakové výšky) pouze vlivem (de)komprese vlastního porézního materiálu a samotné vody. Storativita dosahuje nízkých hodnot a odpovídá $S = S_s b$ a uplatňuje se tedy pouze specifická storativita S_s .

Specifická storativita S_s

Jedná se o hmotnostní (nebo objemový) podíl uvolněné vody z celkové hmotnosti porézního prostředí (např. kolektoru podzemní vody) při poklesu (piezometrické) tlakové výšky o jednotku. Pro podzemní vodu je zpravidla používaná objemová specifická storativita

$$S_s = \frac{1}{V_a} \frac{dV_w}{dh} = \frac{1}{V_a} \frac{dV_w}{dp} \frac{dp}{dh} = \frac{1}{V_a} \frac{dV_w}{dp} \gamma_w \quad (I - 8)$$

kde S_s – objemová specifická storativita [L^{-1}], V_a – objem pevné složky porézního prostředí (kolektoru podzemní vody) [L^3], dV_w – uvolněný objem vody z porézního prostředí [L^3], dp – pokles tlaku porézního prostředí

[$ML^{-1}T^{-2}$], dh – pokles (piezometrické) tlakové výšky [L], γ_w – měrná tíha vody [$ML^{-1}T^{-2}$]

Specifickou storativitu S_s lze rovněž vyjádřit na základě měřitelných fyzikálních veličin jako

$$S_s = \gamma_w (\beta_p + n\beta_w) \quad (I - 9)$$

kde γ_w – měrná tíha vody [$ML^{-2}T^2$], n – pórovitost materiálu [-], β_p – stlačitelnost (kompresibilita) pevné složky porézního prostředí [$M^{-1}L^1T^2$], β_w – stlačitelnost (kompresibilita) vody [$M^{-1}L^1T^2$]

V prostředí s volnou hladinou odpovídá hodnota storativity hodnotě specifické vydatnosti S_y , jelikož tato dosahuje zpravidla řádově vyšších hodnot ve srovnání se specifickou storativitou S_s .

$$S_y \gg S_s b \quad (I - 10)$$

Specifická vydatnost S_y v tomto smyslu představuje „odvodnitelnou“ část pórů a může tedy dosahovat až hodnot efektivní pórovitosti prostředí n_{ef} [-].

$$S_y = \frac{V_{wd}}{V_T} \quad (I - 11)$$

kde: V_{wd} – objem vody [L^3], V_T – objem pevné složky [L^3]

Darcyho zákon

Francouzský inženýr Henry Darcy experimentálně odvodil základní popis proudění podzemní vody jako závislost mezi průtokem $Q[L^3/T]$, rozdílem hydraulických výšek dh [L], plochou průtočného průřezu $A[L^2]$, propustností ve formě hydraulické vodivosti $K[L/T]$ a délkou $L[L]$. V roce 1856 jej publikoval ve formě rovnice:

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (I - 12)$$

kde: K – hydraulická vodivost [L/T], h – piezometrická výška [L], L – délka [L]

Rovnice byla později rovněž odvozena z Navier–Stokesových rovnic a je analogická s Fourierovým zákonem přenosu tepla

(cit. https://en.wikipedia.org/wiki/Darcy%27s_law). Platnost rovnice je omezena pro nasycené prostředí a laminární proudění, v základní formě popisuje pouze jednofázové proudění v izotropním prostředí.

Z Darcyho rovnice je odvozena průměrná rychlost proudění vody skrz celý průtočný profil a tato je zpravidla označována jako Darcyho rychlost $q[L/T^{-1}]$ (resp. Darcy flux), objemový tok jednotkou plochy, fiktivní rychlost... apod.

$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (I - 13)$$

V mikroskopickém měřítku probíhá ve skutečnosti proudění podzemní vody pouze skrz průtočné (tj. efektivní) póry a příslušným podílem je tedy definována (průměrná) skutečná rychlost proudění podzemní vody $v[L/T^{-1}]$.

$$v = \frac{q}{n_{ef}} = \frac{Q}{A \cdot n_{ef}} = K \frac{h_1 - h_2}{L \cdot n_{ef}} \quad (I - 14)$$

Omezení platnosti Darcyho zákona

Darcyho zákon je v principu platný pro laminární proudění v porézním prostředí. Jedná se o lineární vztah mezi tlakovou výškou a průtokem při aplikaci parametrů proudění podzemní vody. Horní hranicí platnosti tohoto vztahu je mez turbulentního proudění, která je definována kritickými hodnotami Reynoldsova čísla Re . Hodnoty pro porézní

prostředí jsou udávány cca v rozsahu 1-4 (Richardson, Lindquist), 7-9 (Pavlovskij) při zahrnutí vliv pórovitosti. Reynoldsovo číslo ovšem není pro porézní prostředí vystihující charakteristikou, hranici mezi lineárním a turbulentním prouděním je vzhledem k plynulosti přechodu obtížné stanovit. Platnost Darcyho vztahu se uvažuje v rozmezí hodnot Reynoldsova čísla 0 až 10. (Holub, J.).

V případě jemnozrnných materiálů působí na vodu v molekulárním měřítku sorpční a vazebné síly, Darcyho vztah tedy začíná platit až po překročení určité hodnoty hydraulického gradientu (Pech, 2010). U hrubozrnných materiálů s převahou setrvačných sil nad viskózními dochází k porušení lineární závislosti mezi rychlostí proudění a hydraulickým gradientem dle Reynoldsova čísla Re (Valentová, 2007).

$$Re = \frac{v_s d}{\nu} \quad (I - 15)$$

kde: v_s – střední hodnota rychlosti proudění kapaliny [LT^{-1}], d – průměr efektivního zrna [L], ν – kinematická viskozita [L^2T^{-1}]

PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY

Základním principem mechaniky tekutin (resp. vyjádřením zákona zachování hmoty) je rovnice kontinuity, která se uplatňuje rovněž v proudění podzemní vody, kdy celková změna rychlosti a hustoty proudící kapaliny v elementárním objemu se rovná časové změně objemu kapaliny uvnitř elementu (Holub, 2019).

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = n \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial n}{\partial t} \quad (I - 16)$$

kde: n – pórovitost materiálu [-], ρ – hustota [M/V], v_x, v_y, v_z – vektorové složky rychlosti proudění [L/T]

Po zavedení specifické storativity S_s ve smyslu množství uvolněné vody z jednotkového objemu zvodnělé vrstvy při jednotkovém poklesu hydraulické výšky, tedy časovou změnu objemu:

$$\rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (I - 17)$$

Společně s předpokladem konstantní hustoty vody a zavedením vztahu pro rychlost proudění dle Darcyho zákona lze definovat neustálené anizotropní proudění nasyceným porézním materiálem

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (I - 18)$$

v redukci pro homogenní izotropní porézní prostředí

$$\left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial h^2}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial h^2}{\partial z^2}\right) = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (I - 19)$$

resp. vyjádřením specifické storativity S_s pomocí tzv. difúzní rovnice

$$\left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial h^2}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial h^2}{\partial z^2}\right) = \frac{\rho g(\alpha + n\beta_v)}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (I - 20)$$

Řešením je funkce $h(x,y,z,t)$ definující (piezometrickou) hladinu v místě a čase. Rovnice dále předpokládá znalost hydraulických parametrů K , α , n a parametrů pro kapalinu ρ a β_v . Pro speciální případ horizontálního kolektoru s napjatou hladinou o mocnosti b lze rovnici vyjádřit ve tvaru

$$\left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial h^2}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial h^2}{\partial z^2}\right) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (I - 21)$$

kde bezrozměrný koeficient storativity $S = S_s b$ a transmisivita kolektoru $T = K \cdot b$ [L²/T] (Freeze & Cherry, 1979)

Stacionární proudění podzemní vody

K proudění podzemní vody dochází za základě gradientu tlakové výšky (hydrostatické či hydrodynamické) a lze jej vyjádřit např. pomocí vektoru rychlosti. Pokud je místně příslušný vektor v daném čase konstantní (tj. nemění se gradient a tím ani rychlost proudění), lze mluvit o proudění ustáleném (stacionárním). Ve smyslu zákona zachování hmoty (kontinuity) zde množství přitékající vody do elementárního objemu odpovídá množství vody, která jej opouští (resp. za předpokladu, že v uvažovaném objemu nedochází ke vzniku ani zániku bilancované vody).

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (I - 22)$$

resp. v úpravě pro konstantní ρ (tj. nestlačitelnou) kapalinu

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (I - 23)$$

kde: v_x, v_y, v_z – vektorové složky rychlosti proudění [L/T], ρ – hustota kapality [ML³]

Kombinací Darcyho zákona s rovnicí kontinuity lze definovat obecný vztah pro ustálené proudění (potenciálně neizotropním) porézním prostředím

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (I - 24)$$

kde: h – tlaková výška [L], K_x , K_y , K_z – hydraulická vodivost dle jednotlivých dimenzí [L/T]

Pro izotropní prostředí platí hodnota $K_x = K_y = K_z$, která je navíc konstantní v případě prostředí homogenního, tedy: $K_{(x,y,z)} = \text{konst.}$ Úpravou pro izotropní homogenní prostředí

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (I - 25)$$

Jedná se o tzv. Laplaceovu rovnici. Jejím řešením funkce $h(x,y,z)$, která popisuje hodnoty hydraulické tlakové výšky v jednotlivých bodech trojrozměrné oblasti řešení a představuje tak základní rovnici pro popis proudění podzemní vody v porézních materiálech v ustáleném režimu proudění (Freeze, Cherry, 1979).

Dupuit-Forchheimerovy postuláty

Jedná se o zjednodušení analytických rovnic proudění podzemní vody (pro ustálené proudění), které formulovali Jules Dupuit a Philipp Forchheimer na konci 18.stol. Tyto předpokládají pouze horizontální složku proudění podzemní vody pro kolektory s volnou hladinou (s odůvodněním příliš nízkého gradientu tlakové výšky), a dále přímou úměru přítoku podzemní vody k mocnosti kolektoru.

- hydraulická tlaková výška $H(x,y,z)$ je rovna výšce podzemní vody $h(x,y)$, proudnice jsou horizontální a ekvipotenciály vertikální
- gradient potenciálu je dán sklonem volné hladiny a je po svislici konstantní

Předpokladem je převážně horizontální směr proudění podzemní vody v kolektoru s volnou hladinou a rovněž, že objemový tok vody je přímo úměrný nasycené mocnosti kolektoru. Po zavedení postulátů lze vyjádřit (tzv. Darcyho) rychlost proudění ve směru x pro homogenní izotropní prostředí jako

$$v_x = -K \frac{dh}{dx} \quad (I - 26a)$$

Průtok podzemní vody q [L²/T], vztažený na jeden metr šířky zvodně, je definován vztahem

$$q = -K h(x) \frac{dh}{dx} \quad (I - 26b)$$

Vyhodnocení základních hydraulických parametrů dle Theise - Jacoba

Za účelem stanovení koeficientů transmisivity a storativity kolektorů podzemní vody z hydrodynamických zkoušek je standardně používána klasická metoda Jacobovy semilogaritmické aproximace, která vychází z řešení základní parciální diferenciální rovnice neustáleného axiálně-symetrického proudění ve tvaru (Theis, 1935)

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (I - 27)$$

kde: s – snížení piezometrické hladiny [L]; r – radiální vzdálenost od osy studny [L]; t – čas [T]; S – storativita [-]; T – transmisivita [$L^2 T^{-1}$]

Theis publikoval řešení rovnice (I - 27) ve tvaru

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (I - 28)$$

$W(u)$ – je Theisova studňová funkce a u je argument Theisovy studňové funkce

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{1}{u} e^{-u} du \quad a \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (I - 29)$$

kde: Q – čerpané množství vody [$L^3 T^{-1}$], $s(r, t)$ – snížení piezometrické hladiny podzemní vody [L]

Theisovu studňovou funkci lze rozepsat do nekonečné řady, potom snížení $s[m]$ vyjádříme rovnicí

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0,5572 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} + \frac{r^2 S}{4Tt} - \frac{1}{2.2!} \left(\frac{r^2 S}{4Tt} \right)^2 + \frac{1}{3.3!} \left(\frac{r^2 S}{4Tt} \right)^3 + \dots \right] \quad (I - 30)$$

Pro $1/u > 100$ (tj. $t_D > 25$) lze s chybou menší než 0,25% v nekonečné řadě uvažovat pouze první dva členy (Jacob, 1947), tj.

$$W(u) \cong -0,577216 - \ln u \quad (I - 31)$$

Po úpravě vznikne vztah pro snížení ve tvaru

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,246 T t}{r^2 S} \quad (I - 32)$$

Použijeme-li místo přirozeného logaritmu dekadický se základem 10, po úpravě, pro snížení v čase t a ve vzdálenosti r od odčerpávaného vrtu dostaneme vztah ve tvaru

$$s(r, t) = \frac{2,3 Q}{4\pi T} \log \frac{2,246 T t}{r^2 S} \quad (I - 33)$$

nebo

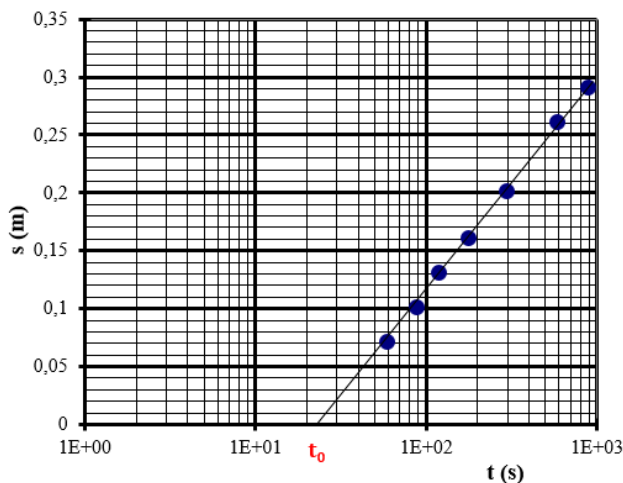
$$s(r, t) = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,246 T t}{r^2 S} \quad (I - 34)$$

Pro vyhodnocení koeficientu transmisivity z druhé přímkové části grafu odečteme pro dva časy t_2 a t_1 snížení s_2 a s_1 a dosazením do (I-34) vyjádříme koeficient transmisivity zvodněného prostředí ve tvaru

$$T = 0,183 \frac{Q}{i} \quad (I - 35)$$

kde: $i = (s_2 - s_1) / (\log t_2 - \log t_1)$

K určení koeficientu storativity $S[-]$ z dat hydrodynamické zkoušky na pozorovacím vrtu: (Horne, 1990)



Obrázek 1. Graf čerpací zkoušky na pozorovacím vrtu (s vs. $\log t$)

Odečtením času t_0 (Obrázek 1), kdy se snížení úrovně HPV začíná projevovat na pozorovacím vrtu, a s využitím rovnice (I - 27) vypočteme koeficient storativity ze vztahu

$$S = \frac{2,246 T t_0}{r^2 S} \quad (I - 36)$$

REÁLNÝ VRT

Bezrozměrné parametry

Pro odvození základních vztahů jsou používány bezrozměrné parametry (Lee, 1982), jejichž význam spočívá ve zjednodušení modelování proudění podzemní vody zahrnutím hydraulických parametrů (tj. konduktivity, transmisivity a storativity) do bezrozměrných veličin, čímž se redukuje počet neznámých. Výhodou je rovněž nezávislé řešení na použitém systému jednotek. Předpokladem ovšem zde je, že ostatní parametry výpočtů jsou konstantní (tj. permeabilita, viskozita, stlačitelnost, pórovitost a výška zvodněné vrstvy).

Bezrozměrné snížení v libovolné vzdálenosti od odčerpávaného vrtu je definováno jako

$$s_D(r_D, t_D) = \frac{2 \pi T}{Q} (H - h(r, t)) \quad (I - 37)$$

kde Q – čerpané množství vody [L^3T^{-1}]; T – transmisivita [L^2T^{-1}]; H – piezometrická výška vody v dosahu depresního kuželu [L]; $h(r, t)$ – piezometrická výška v čase t a ve vzdálenosti r od osy odčerpávaného vrtu [L]; r_D – bezrozměrný poloměr; t_D – bezrozměrný čas.

Bezrozměrné snížení v čerpaném vrtu

$$s_{VD}(r_D = 1, t_D) = \frac{2 \pi T}{Q} (H - h_V(t)) \quad (I - 38)$$

kde h_V – výška vody ve vrtu v čase t [L]; H – piezometrická výška v dosahu depresního kuželu [L];

Bezrozměrný čas

$$t_D = \frac{T t}{r_v^2 S} \quad (I - 39)$$

kde T – transmisivita [L^2T^{-1}]; r_v – poloměr odčerpávaného vrtu [L]; S – storativita [-]; t – čas [T];

bezrozměrný poloměr

$$r_D = \frac{r}{r_V} \quad (I - 40)$$

kde r – radiální vzdálenost od osy čerpaného vrtu [L]; r_V – poloměr čerpaného vrtu [L]

Bezrozměrný koeficient storativity vrtu

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_V^2 S} \quad (I - 41)$$

kde C –jednotkový faktor storativity vrtu [L²]

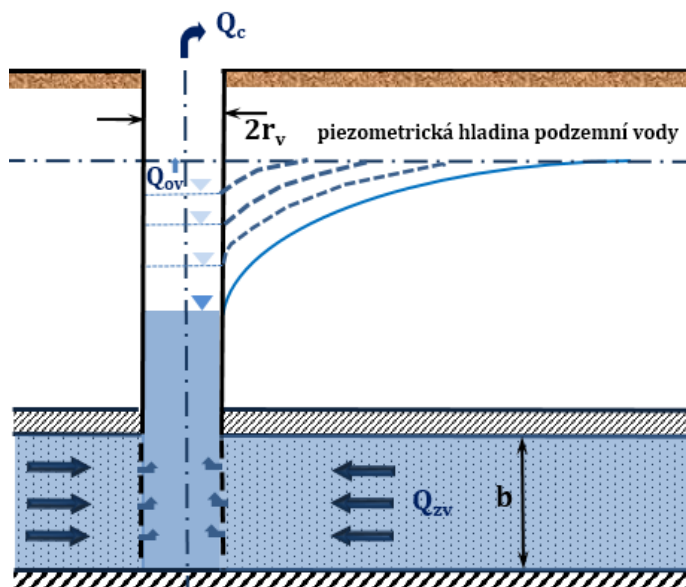
Bezrozměrný sklon prvního přímkového úseku v semi-logaritmickeém grafu s vs $\log t$ (Obrázek 1)

$$I_{1PD} = \frac{2\pi T I_{1P}}{Q} \quad (I - 42)$$

kde: I_{1P} – sklon první přímkové části v grafu čerpací zkoušky

Storativita vrtu

Na úplném počátku hydrodynamických zkoušek (čerpacích a stoupacích), kdy je voda okamžik odčerpávána pouze z vlastního objemu vrtu, resp. kdy se tento vrt začíná plnit od okamžiku ukončení čerpání, ovlivňuje tento jev průběh snížení v závislosti na čase, a to až do chvíle, kdy nastupuje tzv. druhá přímková část v grafu hydrodynamické zkoušky (tj. do počátku přítoku podzemní vody z kolektoru). V případě vyhodnocení dodatečných odporů z 1. přímkového úseku je nutné vliv objemu vody ve vrtu v počátku hydrodynamické zkoušky brát v úvahu, protože v případě zanedbání tohoto efektu dochází k výrazné nepřesnosti v určení velikosti koeficientu dodatečných odporů W [-]. Podrobněji se tomuto vlivu věnoval (Ramey, 1970) a (Lee, 1982) v oblasti vyhodnocování čerpacích zkoušek na naftových vrtech. Při odvození závislosti sklonu prvního přímkového úseku čerpací zkoušky na dodatečných odporech a bezrozměrné storativitě vrtu je vliv plnění, resp. prázdnění vrtu vzat v úvahu.



Obrázek 2. Reálný vrt – počátek čerpací zkoušky (Q_{ov} – čerpané množství vody z vrtu; Q_{zv} – přítokové množství vody ze zvodněné vrstvy (Pech, 2010)

Při odběru konstantního množství vody z vrtu Q_c , je nejprve čerpána voda z vlastního objemu vrtu a přítok ze zvodněné vrstvy je nulový ($Q_{zv}=0$). Hladina vody ve vrtu klesá a hydraulický gradient mezi vrtem a zvodněnou vrstvou za pažnicí vzrůstá, poté začíná přitékat do vrtu voda i ze zvodněné vrstvy. Následuje časový interval, kde je čerpané množství vody z vrtu dáno kombinací čerpané vody z vlastního objemu vrtu, Q_{ov} a přítokového množství vody ze zvodněné vrstvy, Q_{zv} . Se vzrůstajícím časem podíl čerpaného množství vody z vlastního objemu vrtu postupně klesá a na čerpaném množství vody z vrtu, Q_c s časem vliv objemu vody ve vrtu postupně mizí a čerpané množství vody z vrtu, Q_c se vyrovná s přítokem vody ze zvodněné vrstvy, Q_{zv} .

Podle (Ramey, 1970) je vliv objemu vody ve vrtu na časový průběh snížení charakterizován vlastností nazvanou storativita vrtu (wellbore storage) a parametrem „jednotkový faktor storativity vrtu“ C [-]. Pro rovnováhu podzemní vody vstupující do vrtu ze zvodněné vrstvy a odčerpávané vody lze psát obdobně jako v (Lee, 1982)

$$Q_{zv} = Q_c - C \frac{d s_v}{dt} \quad (I - 43)$$

kde: s_v – snížení vody ve vrtu [L]; C – jednotkový faktor storativity vrtu [L²]; t – čas [T];

Rovnice (I - 36) je vnitřní hraniční podmínkou pro případ konstantního čerpaného množství vody, Q_C při uvažování storativity vrtu. Při použití bezrozměrných veličin – rovnice (I - 30), (I - 32) a (I - 34) v rovnici (I - 36) dostáváme

$$\frac{Q_{ZV}}{Q_C} = 1 - C_D \frac{ds_D}{dt_D} \quad (I - 44)$$

Pro malé hodnoty C_D nebo malou hodnotu poměru (ds_D/dt_D) je $(Q_{ZV}/Q_C) \cong 1$, tj. storativita vrtu, resp. přítok ze zvodněné vrstvy jsou zanedbatelné. (Ramey, 1970) uvádí, že pro počáteční časy čerpacích i stoupacích zkoušek, danou hodnotu storativity vrtu C_D i většinu hodnot koeficientu dodatečných odporů $W [-]$ lze nalézt v grafu hydrodynamické zkoušky ($\log s$ vs. $\log t$) část s jednotkovým sklonem (odklon přímkového průběhu od horizontální osy je 45° viz (Obrázek 4). „Přímková část“ s jednotkovým sklonem „trvá“ dokud je všechna voda čerpána pouze z vlastního objemu vrtu, tj. $(Q_{ZV}/Q) = 0$ a z rovnice (I - 17) dostáváme

$$1 - C_D \frac{ds_D}{dt_D} = 0 \quad (I - 45)$$

nebo

$$dt_D = C_D ds_D \quad (I - 46)$$

Integrací v mezích $t_D = 0$ $s_D = 0$ a t_D s_D dostaneme

$$C_D s_D = t_D$$

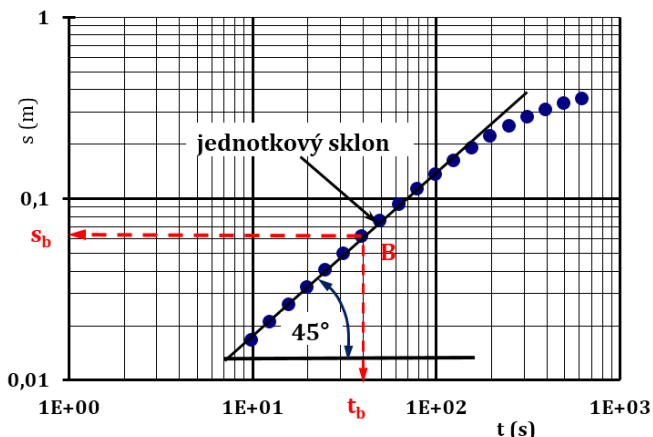
nebo

$$\frac{C_D s_D}{t_D} = 1 \quad (I - 47)$$

Libovolný bod v grafu $\log s_D$ vs $\log t_D$ musí splňovat rovnici (I -47). Dosadíme-li za bezrozměrné veličiny vztahy (I -37) – (I -41), dostaneme pro jednotkový faktor storativity vrtu, $C [-]$ vztah

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} \quad (I - 48)$$

kde: t_j – jednotkový čas [T], s_j – jednotkové snížení hladiny [L]



Obrázek 3. Graf log s vs. log t na počátku čerpací zkoušky, kdy je voda čerpána jen z vlastního objemu vrtu (Pech, 2010)

Na počátku čerpací zkoušky (Obrázek 3) pro libovolný bod B odečteme na vodorovné ose s_b a t_b a vypočteme „jednotkový faktor“ storativity vrtu z rovnice (I - 41)

$$C = Q \frac{t_b}{s_b} \quad (I - 49)$$

A z rovnice (Obrázek 3.) se určí bezrozměrný koeficient storativity vrtu:

$$C_D = \frac{C}{2 \pi r_v^2 S} \quad (I - 50)$$

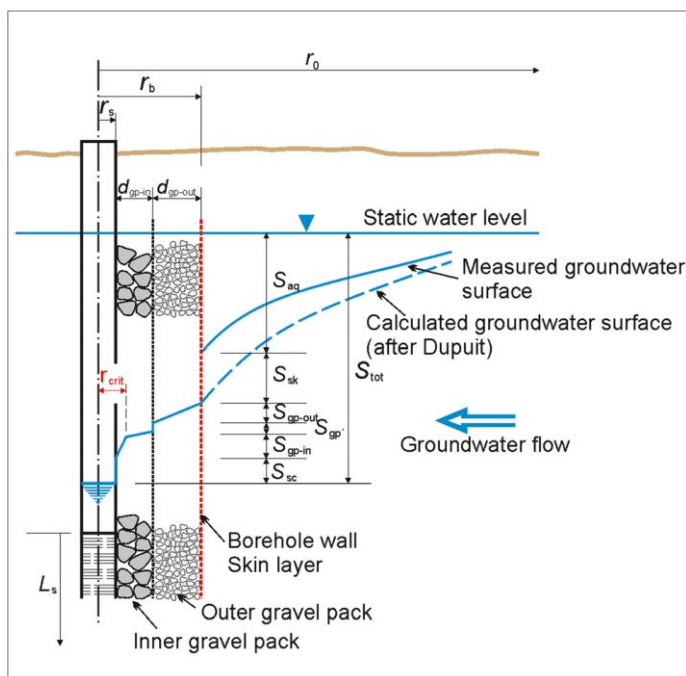
Dodatečné odpory (skin effect)

Snížení hladiny vody ve „skutečném“ vrtu (tj. případ, kdy uvažujeme existenci dodatečných odporů na čerpaném vrtu a jeho blízkém okolí) závisí na tlakovém odporu nasyceného porézního prostředí, viskozitě a na tzv. dodatečných ztrátách tlaku vznikajících ve vrtu, na jeho stěnách a v 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 snížení hladiny při čerpací zkoušce, tj. nedochází k ovlivnění snížení tímto objemem vrtu). Snížení hladiny vody (resp. zvýšení) naměřené na čerpaném (resp. infiltračním) vrtu 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 vystrojování jímacích vrtů (např. snížení propustnosti

v bezprostředním okolí vrtu vlivem ztráty vrtného výplachu do porézního prostředí při metodě rottary, důsledkem čehož je vznik tzv. „kalové kůry,“ 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 a biologické jevy, které se mohou vyskytnout na vrtu a jeho okolí v průběhu využívání vrtu. Znalost velikosti dodatečných odporů, resp. dodatečného snížení, připadajícího na působnost dodatečných odporů, je nezbytná při stanovení storativity z údajů o snížení hladiny naměřených na odběrovém vrtu za nestacionárního režimu proudění a při stanovení koeficientu filtrace za stacionárního režimu (Pech, 2010).

Snížení hladiny, připadající na působení dodatečných odporů, je možné rozdělit na část snížení způsobené:

- a) *kolmatací* (s_1) tj. ucpáváním pórů obsypu, rozhraní horninového prostředí a perforačních otvorů výstroje 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 v okolí vrtu, a tím ke snížení propustnosti.
 - I. *mechanická kolmatace* ($s_{1.1}$): zanášení porézního prostředí zejména jemnozrnným sedimentárním materiálem. Dochází k ní přirozeně zejména na rozhraní horninové prostředí/obsyp vrtu v závislosti na gradientu hladiny při vtoku vody do jímacího vrtu, nebo vlivem reziduí vrtného výplachu či těsnění vrtu.
 - II. *chemická kolmatace vrtu* ($s_{1.2}$): zanášení porézního prostředí produkty oxidace (zpravidla Fe, Mn a Ca), tvorba tvrdých minerálních nárůstů (inkrust). Projevuje se zejména v perforačních otvorech na rozhraní obsyp vrtu/výstroj vrtu.
 - III. *biologická kolmatace vrtu* ($s_{1.3}$): doprovodný efekt oxidačně-redukčních procesů a jeho produktem jsou polotekuté šlemy (biofilm).
- b) *zmenšením aktivního průřezu stěny vrtu* pro přítok vody (s_2) tam, kde je stěna vrtu tvořena filtrem, perforovanou pažnicí apod.
- c) *neúplným průnikem* (s_3) - neúplným otevřením mocnosti zvodnělé vrstvy vrtem (tzv. neúplné vrty)
- d) *třením* (s_5) vody o stěny vrtu a jejím vnitřním třením (do této skupiny zařazujeme i dodatečné odpory vznikající turbulencí uvnitř vrtu)
- e) *turbulentním režimem proudění* (s_6) ve zvodnělé vrstvě, zejména v blízkosti odběrového vrtu
- f) dalšími druhy dodatečných odporů (s_n)



Obrázek 4. Dodatečné odpory ve vrtu bez znázornění vlivu vertikálního proudění (Houben, 2015)

Celkové snížení připadající na působení dodatečných odporů vyjádříme

$$S_{DO} = S_{skin} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (I - 51)$$

$S_{DO} = S_{skin}$ – dodatečné snížení hladiny ve vrtu (tzv. skok na plášti) způsobené dodatečnými odpory (v tzv. kolmatační zóně) s_i – část dodatečného snížení připadající na i -tý dodatečný odpor n – počet uvažovaných dodatečných odporů. Separace jednotlivých složek dodatečných odporů je velmi problematická, a proto je k charakteristice dodatečných odporů užíván sumární bezrozměrný koeficient dodatečných odporů (Pech, 2010), W (v anglosaské literatuře označovaném jako skin faktor). Celkové snížení hladiny vody naměřené v odběrovém vrtu během přítokové zkoušky, lze vyjádřit vztahem (Obrázek 3)

$$S_V = S_{TE} + S_W \quad (I - 52)$$

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].

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).

$$s_{DO} = \frac{Q}{2\pi T} W \quad (I - 53)$$

kde: W - bezrozměrný koeficient dodatečných odporů [-]; s_{DO} - snížení způsobené dodatečnými odpory [L]

Vliv dodatečných odporů zahrneme do celkového snížení na „skutečném“ vrtu při proudění s napjatou hladinou:

- *pro stacionární proudění*

$$s_V = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{R}{r_V} + W \right) \quad (I - 54)$$

kde: R - dosah depresního kuželu [L]; r_V - poloměr vrtu [L]; W - koeficient dodatečných odporů [-]

- *pro nestacionární proudění*

a) dosazením bezrozměrného koeficientu dodatečných odporů, W do Theisova řešení neustáleného radiálně-symetrického proudění podzemní vody k úplnému vrtu

$$s_V = \frac{Q}{4\pi T} (W(u) + 2W) \quad (I - 55)$$

kde: $W(u)$ je Theisova studňová funkce a W je bezrozměrný koeficient dodatečných odporů.

b) Pro hodnoty $1/u > 100$ s chybou menší než 0,25% (bezrozměrný čas $t_D > 25$) bude upravený Jacobův vztah pro reálný vrt

$$s_V = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{2,246 T t}{r_V^2 S} + 2W \right) \quad (I - 56)$$

Po převedení přirozeného logaritmu na dekadický a úpravě dostáváme vztah

$$s_v = \frac{0,183 Q}{T} \left(\log \frac{2,246 T t}{r_v^2 S} + 2W \right) \quad (I - 57)$$

Z rovnice (I -50) vyplývá, že hodnotu transmisivity lze na reálném čerpaném vrtu vyhodnotit pomocí metody Jacobovy semilogaritmické aproximace, protože výše dodatečných odporů tento parametr neovlivňuje (pouze míru výsledného poklesu hladiny). Přímkový úsek, pro vyhodnocení Jacobovou semilogaritmickou metodou, nemění svůj sklon, ale posouvá se s velikostí dodatečných odporů ve svislém směru, což na vyhodnocení nemá vliv (Pech, 2010).

Odvození vztahu pro vyhodnocení dodatečných odporů ze sklonu počátečního úseku hydrodynamické zkoušky

Za „reálný“ lze označit takový vrt, u kterého bereme (oproti vrtu ideálnímu) v úvahu existenci dodatečných odporů na vrtu a jeho nejbližším okolí a v počátečním úseku hydrodynamické zkoušky zahrnujeme do výpočtů i vliv storativity vrtu. Při řešení byla použita rovnice radiálně symetrického přítoku podzemní vody k vrtu za neustálenému režimu (I- 21) převedená do bezrozměrných veličin s počátečními a okrajovými podmínkami, která byla původně zavedena v naftové oblasti (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970). Rovnice pro proudění podzemní vody má tvar (Pech, 2010)

$$\frac{\partial^2 s_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial s_D}{\partial r_D} = \frac{\partial s_D}{\partial t_D} \quad (I - 58)$$

Předpoklady jsou stejné jako pro Theisovo řešení ideálního vrtu s předpoklady:
 Vrt je konečného objemu a na počátku čerpání se uvažuje s vlivem objemu vody ve vrtu na průběh snížení
 Koeficient storativity vrtu je konstantní a v průběhu čerpání se nemění
 Uvažuje se vliv dodatečných odporů vznikajících ve vlastním vrtu a jeho nejbližším okolí, kdy dosah kolmatační zóny obvykle dosahuje pouze cca <0,2m (De Zwart, 2007).

Počáteční a okrajové podmínky pro reálný vrt v bezrozměrných veličinách mají tvar

$$s_D(r_D, 0) = 0 \quad (I - 59)$$

$$s_D(r_D, t_D) = 0 \text{ pro } r_D \rightarrow \infty \quad (I - 60)$$

Pro dodatečné odpory W

$$s_{vD} = s_D + \left(r_D \frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right)_{r_v} W \quad (I - 61)$$

Pro storativitu vrtu C_D

$$C_D \frac{ds_D}{dt_D} - \left(r_D \frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right) = 1 \quad (I - 62)$$

K řešení rovnice (I -57) byla užitá jednorozměrná jednostranná úprava Laplaceovou transformací, pomocí které byla převedena parciální diferenciální rovnice v bezrozměrných parametrech (I -58) prostou diferenciální rovnicí. K tomuto účelu je užitá transformační funkce, jež má pro řešený případ tvar

$$F(p) = \mathcal{L}(f(t_D)) = \int_0^{\infty} f(t_D) e^{-p t_D} dt_D \quad (I - 63)$$

Jedná se o integrální transformaci s jádrem $\exp(-p t_D)$, kde p je komplexní proměnná a $F(p)$ je obraz daného předmětu $f(t_D)$. V Laplaceově prostoru má řešení tvar:

$$\overline{s_D} = \frac{K_0 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) + W p^{\frac{1}{2}} K_1 \left(p^{\frac{1}{2}} \right)}{p \left[p^{\frac{1}{2}} K_1 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) + C_D p^{\frac{1}{2}} \left(K_0 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) + W p^{\frac{1}{2}} K_1 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) \right) \right]} \quad (I - 64)$$

kde: $\overline{s_D}$ je řešení bezrozměrného snížení pro r_D a t_D v Laplaceově prostoru, p – komplexní proměnná; K_0 – je modifikovaná Besselova funkce druhého druhu nultého řádu (imaginárního argumentu); K_1 – Besselova funkce druhého druhu prvního řádu (imaginárního argumentu); C_D – bezrozměrný koeficient storativity vrtu; W – bezrozměrný koeficient dodatečných odporů;

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

$$s_D(r_D, t_D) = f(t_D) = \mathcal{L}^{-1}(F(p)) \quad (I - 65)$$

Pro originál $f(t_D)$ k Laplaceově oprazu $F(p)$ byl použit Stehfestův algoritmus 368 (Stehfest, 1970), který je často aplikován pro hydraulické výpočty v oboru těžby ropy a rovněž v hydraulice podzemních vod (Chu, García-Rivera, & Raghavan, 1980), (Raghavan & Tongpenyai, 1981) a (Pech, 2010). Pro řešený případ platí

$$f(t_D) = \sum_{j=1}^{n/2} X_j \left(\frac{n}{2}\right) P_{(n/2+1-j)} \quad (I - 66)$$

kde:

$$X_j \left(\frac{n}{2}\right) = \frac{(-1)^{(j-1)}}{\left(\frac{n}{2}\right)!} \left(\frac{n}{2}\right)_j \left(\frac{n}{2} + 1 - j\right)^{\left(\frac{n}{2}-1\right)} \quad (I - 67)$$

$$P_n = \frac{\ln 2}{t_D} \frac{(2n)!}{n!(n-1)!} \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (-1)^i F\left((n+i) \frac{\ln 2}{t_D}\right) \quad (I - 68)$$

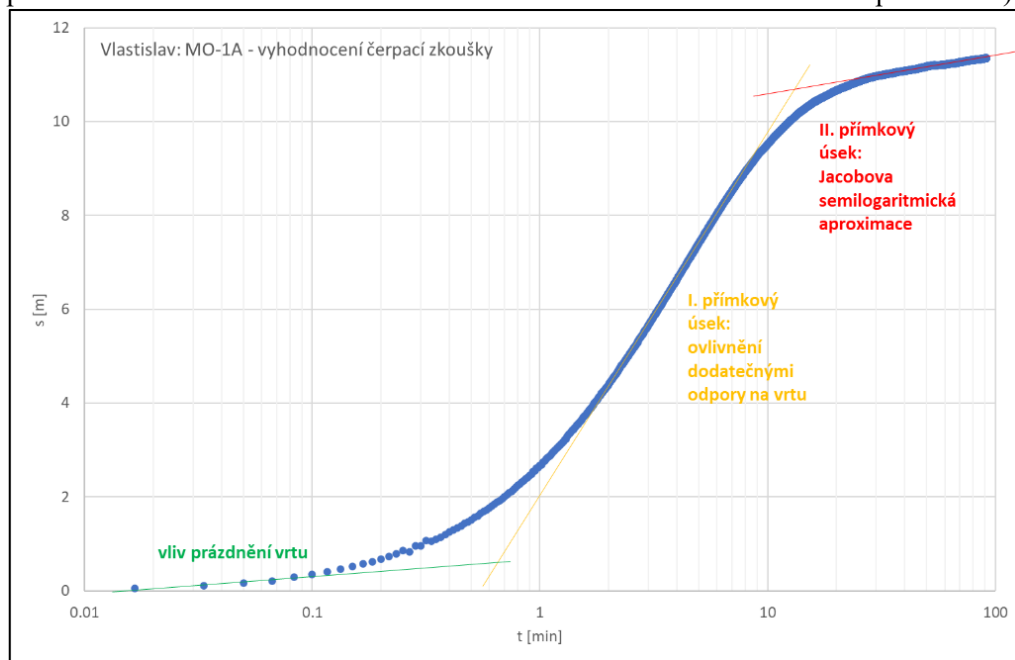
Pro konkrétní výpočty je vhodné použít hodnotu $n=12$ (Raghavan & Tongpenyai, 1981). Programem STEHFEST (Pech, 2010) byly vypočteny hodnoty bezrozměrných snížení v odběrovém vrtu pro bezrozměrné časy 1 až 107 a pro koeficienty dodatečných odporů $W=0; 2; 4; 6; 8; 10; 12,5; 15; 20; 30; 35;40; 50$ a pro bezrozměrné koeficienty storativity vrtu $C_D = 10, 50; 5 \cdot 10^2; 10^3; 5 \cdot 10^3; 10^4; 5 \cdot 10^4; 10^5; 5 \cdot 10^5; 10^6; 5 \cdot 10^6$ a 10^7 . Příklad výpočtů (Kahuda, Pech, 2020) pro $C_D = 103$ a $W = 0, 10, 20$ a 30 .

Odvození závislosti sklonu I. přímkového úseku na W a C_D

Z Obrázku 6 vyplývá, že ve vztahu s_D vs. $\log t_D$ existují 2 základní přímkové úseky. První úsek se objevuje v počátečním časovém úseku, tj. v době, kdy snížení na vrtu (při konstantním odběru Q) je ovlivněno dodatečnými odpory na vrtu a jeho blízkém okolí (rovněž objemem vrtu - resp. storativitou vrtu C_D). Sklon první přímkové části je označen i_{zD} . Druhý přímkový úsek potom odpovídá oblasti, která je vyhodnotitelná Jacobovou semilogaritmickou aproximací. V praxi je rovněž možný výskyt většího množství přímkových úseků (v případě dosahu snížení hladiny podzemní vody do prostředí s odlišnou konduktivitou nebo při tlakovém kontaktu s okrajovou hydraulickou podmínkou), nebo i jen jediného (v případě neexistence dodatečných odporů, zanedbatelnému objemu vrtu nebo výrazně puklinovému charakteru zvodnělé vrstvy, kdy přítok do vrtu již v pravém smyslu neodpovídá proudění podzemní vody

porézním

prostředím).



Obrázek 5. Příklad grafu s_D vs. $\log t_D$ na reálném vrtu

Po výpočtu hodnot bezrozměrných sklonů přímkových úseků I_{1PD} , pro uvažovaný rozsah hodnot koeficientu dodatečných odporů, $W = 0-50$ a bezrozměrného koeficientu storativity vrtu, $C_D = 10^2-10^7$ lze závislost bezrozměrných sklonů prvních přímkových úseků I_{1PD} pro koeficienty dodatečných odporů, W a bezrozměrné koeficienty storativity vrtu C_D vyjádřit graficky jako soustavu přímek dle základní rovnice:

$$I_{1PD} = a W + b \quad (I - 69)$$

A aplikací metody nejmenších čtverců odvodit vztahy pro vyhodnocení parametrů a a b

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n W_i (i_{zd})_i - \sum_{i=1}^n W_i \sum_{i=1}^n (i_{zd})_i}{n \sum_{i=1}^n W_i^2 - (\sum_{i=1}^n W_i)^2} \quad (I - 70)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n W_i^2 \sum_{i=1}^n (i_{zd})_i - \sum_{i=1}^n W_i \sum_{i=1}^n W_i (i_{zd})_i}{n \sum_{i=1}^n W_i^2 - (\sum_{i=1}^n W_i)^2} \quad (I - 71)$$

Po dosazení výpočtu a dosazení koeficientů a , b do rovnice (I-69)

$$I_{1PD} = 0,86 W + 1,0127 (\log C_D) + 1,0237 \quad (I - 72)$$

Do rovnice dosadíme za bezrozměrný sklon I_{IPD} (I-42). Vyjádříme bezrozměrný koeficient dodatečných odporů

$$W = \frac{1}{0,86} \left(\frac{2\pi T I_{1P}}{Q} - 1,027 \log C_D - 1,0237 \right) \quad (I - 73)$$

Kapitola II

A New Method for the Evaluation of Well Rehabilitation from the Early Portion of a Pumping Test

D. Kahuda, P. Pech (podíl disertanta 50%)

Dle Water 12 (3), 744 (2020): <https://doi.org/10.3390/w12030744>

Content

Abstract	31
Introduction	32
Materials and methods	35
Real Wells	37
Deriving the New Correlation to Evaluate the Skin Factor from the First Straight Line	41
Results	47
Discussion and Conclusions	58

Abstract

This study analyzes the unsteady groundwater flow to a real well (with wellbore storage and the skin effect) that fully penetrates the confined aquifer. The well is located within an infinite system, so the effect of boundaries is not considered. The Laplace-domain solution for a partial differential equation is used to describe the unsteady radial flow to a well. The real space solution is obtained by means of the numerical inversion of the Laplace transform using the Stehfest algorithm 368. When wellbore storage and the skin effect dominate pumping test data and testing is conducted for long enough, two semilogarithmic straight lines are normally obtained. The first straight line can be identified readily as the line of the maximum slope. The correlation of the dimensionless drawdown for the intersection time of this first straight line, with the log time axis as a function of the dimensionless wellbore storage and the skin factor, is shown. This paper presents a new method for evaluating the skin factor from the early portion of a pumping test. This method can be used to evaluate the skin factor when the well-known Cooper–Jacob semilogarithmic method cannot be used due to the second straight line not being achieved in the semilogarithmic graph drawdown vs. the log time. A field example is presented to evaluate the well rehabilitation in Veselí nad Lužnicí by means of the new correlation.

Keywords: groundwater; unsteady flow; pumping test; Laplace transform; well rehabilitation; wellbore storage; skin effect

Introduction

For groundwater, a pumping test is a field test in which a well is pumped at a constant rate, and “drawdown” (the difference between the height of water at time = 0 and the height of water in actual time) is measured and analyzed. In petroleum engineering, the “drawdown” test is a test with a constant rate, q , that measures the pressure response. Pumping tests are widely used for the evaluation of aquifer hydraulic parameters, including transmissivity, T , and the storage coefficient of the aquifer, S . These tests have wide applications in the field of petroleum engineering and groundwater hydraulics based on the Theis analytical solution (Theis, 1935) for drawdown at the well caused by pumping at a constant rate from a full well in a homogeneous, uniform, and confined aquifer with a negligible well radius, as well as when the flow to the well is not influenced by the outer boundaries and additional resistances in a well and in its surroundings. The most commonly used method in well testing derived from the Theis solution is based on a semilogarithmic presentation of the drawdown at the well vs. the logarithm of pumping time. This method was introduced by Cooper and Jacob for drawdown tests (Cooper & Jacob, 1946). The Cooper–Jacob semilogarithmic method is a more restricted version of the Theis well function and describes the drawdown at an “ideal well”, which means a well with a negligible well radius and without additional types of resistance in the well and its surroundings. There has been a continuous development of analytical models and well-testing procedures for petroleum and groundwater areas. This testing is reflected in the many books published on petroleum engineering and groundwater hydraulics (Bourdet, 2002), (Lee, 1982), (Horne, 1990), (Kresic, 2007), (Watlton, 2007), (Batu, 1998), (Kruseman & de Ridder, 2008).

In reality, the radius of a pumping well and the additional resistance in a well and its surroundings are non-zero; thus, these assumptions may lead to some errors in the data analyses (Tongpenyai & Raghavan, 1981), (Novakowski, 1989). Under the assumption of a finite radius for the pumping well ($r_w \neq 0$), the “wellbore storage effect” (the volume of water inside a wellbore), and its influence on pumping test evaluations, was published by Papadopulos-Cooper (Pasandi, Samani, & Barry, 2008), (Papadopulos & Cooper, 1967), who presented a close form solution for the drawdown in a large-diameter well, while also accounting for the effect of wellbore storage.

Other authors have studied this phenomenon and its influence on well drawdown in petroleum and groundwater areas during early periods of pumping (Moench, Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers, 1985), (Chen & Lan, 2009), (Ramey H. J., 1970), (Yeh, Yang, & Peng, A new closed-form solution for a radial two-layer drawdown equation for groundwater under constant-flux pumping in a finite-radius well, 2003), (McKinley, 1971), (Kabala, 2001). Testing the

wellbore storage during the early period of pumping has an influence on well drawdown (Ramey & Agarwal, 1972); neglecting its effects could result in overestimating the storage coefficient from, for example, the type curve method. Additional resistance in the pumping well and in the damaged zone near the well induces extra a head loss known as the skin effect. There are many factors that cause the skin effect, including physical, chemical, and biological processes acting on the well and its immediate surroundings. These processes include the invasion of mud during the drilling process, incomplete perforations, fine material migration near the well, and others. The skin effect is presented by a dimensionless skin factor, denoted here as SF. This factor is used to characterize all additional resistance in the pumping well and in the surrounding well: the larger the skin factor, the greater the drawdown loss. The permeability damage to aquifers caused by drilling operations with drilling mud ranges from a few millimeters to several centimeters and during ageing (exploitation) of the well, the permeability damage is caused by physical, chemical, and biological processes; moreover, the skin zone can reach several meters (Novakowski, 1989). The additional resistance (the skin effect) and finite volume of a wellbore (wellbore storage) are the two main factors that influence the pumping test data measured at a well. The drawdown caused by additional resistance (the skin effect) was introduced, for the first time in petroleum engineering, by van Everdingen and Hurst (Van Everdingen, The Skin Effect and its influence on the Productive Capacity of a Well, 1953), (Hurst, 1953), (Hawkins Jr., 1956). Since then, many authors in the fields of petroleum and groundwater hydraulics have published articles focused on the problem of the influence of the skin effect and wellbore storage on the measured values of the real drawdown or pressure drops in a well (Park & Zhan, 2002), (Barua & Bora, 2010), (Jargon, 1976), (Yang & Yeh, Solution for flow rates across the wellbore in a two-zone confined aquifer, 2002), (Chen & Chang, 2006), (Basak, 1979), (Sen, 1989), (Chu, García-Rivera, & Raghavan, 1980). In 1970, Agarwal (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970) presented a fundamental study of the importance of wellbore storage and skin on the short-time transient flow and introduced the idea of log-log type curve matching to analyze pressure data for a well dominated by the skin effect and wellbore storage. Subsequently, many other type curve methods have been presented. A type curve method is a graphical representation of the theoretical solution to flow equations. A type curve analysis consists of finding the theoretical type curve that “matches” the actual response from a test well and reservoir when subjected to changes in production rates or pressures. These tests are usually presented in terms of dimensionless pressure, dimensionless time, dimensionless radius, and dimensionless wellbore storage rather than real variables. The reservoir parameters (such as permeability) and well parameters (for example, skin) can be evaluated from the dimensionless parameters

defining that type of curve (Earlougher & Kersch, Analysis of short-time transient test data by type-curve matching, 1974), (Earlougher R. J., 1977) , (Bourdet, Whittle, Douglas, & Pirard, 1983) , (Gringarten, Bourdet, Landel, & Kniazeff, 1979) , (Yeh & Chang, 2013) , (Yeh & Chen, 2007) , (Mashayekhizadeh & Ghazanfari, 2011) , (Kuchuk & Kirwan, 1987) , (Wattenbarger & Ramey, 1970) , (Moench, Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers, 1985) , (Wen, Huang, & Zhan, 2006)]. Among the many type curve methods, two are mentioned further: Gringarten type curves (Gringarten, Bourdet, Landel, & Kniazeff, 1979) and the pressure derivative method (Bourdet, Well test analysis: The use of advanced interpretation models, 2002). There are three dimensionless groups that Gringarten uses when developing a type curve: dimensionless pressure, the ratio of dimensionless time and dimensionless wellbore storage, and the dimensionless characterization group, $CD e^{2SF}$. All type curve solutions are obtained for the drawdown solutions. The Gringarten type curve can also be used for a gas system, but the dimensionless pressure drop and time must be redefined. Bourdet defined the pressure derivative as the derivative of dimensionless pressure with respect to dimensionless time. From a mathematical point of view, the derivative of pressure with respect to time is even more fundamental than pressure itself, as the pressure's partial derivative appears directly in the diffusivity equation describing the transient fluid flow in an aquifer system. Bourdet and his co-authors proposed that flow regimes can have clear characteristic shapes if the "pressure derivative", rather than pressure, is plotted against time in the log-log coordinates. Since the introduction of the pressure derivative type curve, well-testing analysis has been greatly enhanced. The use of pressure derivative type curves offers the following advantages: flow regimes have clear characteristic shapes on the derivative plot, and the derivative plots are able to be displayed in a single graph with many separate characteristics that would otherwise require different plots. This derivative approach improves the definition of the analysis plots and, therefore, the quality of the interpretation and quantitative estimation of aquifer properties becomes more reliable. By using this method, interpretation is not only simple but also more accurate (Tongpenyai & Raghavan, 1981). Interesting methods for evaluating the transmissivity, wellbore storage, and skin factor from the early-time portion of pumping test data was published in (Chu, García-Rivera, & Raghavan, 1980). If the skin effect and wellbore storage dominate the drawdown data, and if testing has been conducted long enough, two semilogarithmic straight lines are normally obtained. For an infinite aquifer (where the boundary effect does not interfere with the pumping test data), the second straight line is the appropriate Cooper–Jacob straight line. The first straight line is the line of the maximum slope and is typical for early time points. The slope of this straight line is affected by wellbore storage and skin effect. The new method for evaluating the skin

factor in a single well fully penetrating the confined aquifer from the early portion of a pumping test is derived under the following assumptions: non zero additional resistance at the pumping well, a finite well radius (wellbore storage effect), and the well being situated in an infinite aquifer (where no observation well is available). The solution of the general partial differential equation of a symmetrical radial water flow to a well in Laplace space was used (Chen & Lan, 2009). The Laplace transform was numerically inverted by the Stehfest algorithm 368 (Stehfest, 1970), which is very often used in groundwater flow problems (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970), (Wen, Huang, & Zhan, 2006), (Van Everdingen & Hurst, 1949), (Pech & Novotny, 2005), (Novotny & Pech, 2005), (Pech P., Estimation of a well damage or stimulation, 2004), (Holub, Pech, Kuraz, Maca, & Kahuda, 2019), (Raghavan R., 1993). Here, we present a correlation of the dimensionless drawdown in dimensionless time for the intersection the first straight-line with the horizontal axis (log time) in a semilogarithmic graph as a function of the dimensionless wellbore storage constant and skin factor. Using this correlation, a new procedure for evaluating the skin factor is presented. This new method to evaluate the skin factor from the early portion of a pumping test is not intended to replace any of the approaches presented in the literature but rather to supplement them.

Materials and methods

In deriving a new method for evaluating the coefficient of additional resistance (skin factor, SF) from the early part of a pumping test, dimensionless parameters were used, as is commonly done in petroleum engineering (Lee, 1982), (Horne, 1990), (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970), (Raghavan R., 1993). Dimensionless parameters simplify the solution of hydrodynamic tests on wells by including parameters such as hydraulic conductivity, transmissivity, aquifer storage coefficient, time, well radius, etc. into the dimensionless parameters. By introducing dimensionless parameters, we reduce the number of unknowns, ensuring that the solution is independent of the unit systems being used. To solve the groundwater flow to the well, these dimensionless parameters were defined as follows (Lee, 1982), (Pech P., Estimation of a well damage or stimulation, 2004), (Holub, Pech, Kuraz, Maca, & Kahuda, 2019):

- Dimensionless drawdown at any distance from the well being pumped:

$$s_D(r_D, t_D) = \frac{2 \pi T}{Q} (H - h(r, t)) \quad (II - 1)$$

where Q is the pumping rate [L^3T^{-1}]; T is the transmissivity [L^2T^{-1}]; H is the hydraulic head within the radius of well influence [L] and $h(r, t)$ is the hydraulic head at time t and at a distance r from the well axis [L]; and r_D is dimensionless radius and t_D is dimensionless time.

- Dimensionless drawdown in the pumped well:

$$s_{wD}(r_D = 1, t_D) = \frac{2 \pi T}{Q} (H - h_w(t)) \quad (II - 2)$$

where h_w is the hydraulic head in the well at time t [L], and H is the initial hydraulic head in time equal zero [L].

- Dimensionless time:

$$t_D = \frac{T t}{r_w^2 S} \quad (II - 3)$$

where r_w is the well radius [L]; S is the storage coefficient (aquifer storativity) [-]; and t is time [T].

- Dimensionless intersection time

$$t_D^* = \frac{T t^*}{r_w^2 S} \quad (II - 4)$$

where t^* is time where the “first semilogarithmic straight line” intersects the horizontal axis $\log t_D$

- Dimensionless radius

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (II - 5)$$

where r is the radial distance from the well pumped axis [L], and r_w is the well radius [L].

- Dimensionless coefficient of wellbore storage

$$C_D = \frac{C}{2 \pi r_w^2 S} \quad (II - 6)$$

where C is the “unit factor” of the wellbore storage [L^2] defined in [20].

- Dimensional drawdown for the intersection time t^* of the “first straight line” with the horizontal axis, $\log t_D$:

$$s_D^* = \frac{2 \pi T}{Q} s^* \quad (II - 7)$$

where s^* is the drawdown at the point of intersection between the “first straight line” segment with the time axis [L]

One of the criteria divides wells into two groups. The first are ideal wells, and the second are real wells. An ideal well is a well whose radius is infinitely small ($r_w \rightarrow 0$) and whose additional resistance in the well and its immediate vicinity is zero. In this article, we will not focus on ideal wells and the evaluation of hydrodynamic tests on these wells. The basic literature dealing with the evaluation of hydrodynamic tests on ideal wells includes (Bourdet, 2002), (Lee, 1982), (Horne, 1990), (Kresic, 2007), (Batu, 1998), (Kruseman & de Ridder, 2008), .

REAL WELLS

Wellbore Storage

The first assumption that distinguishes real wells from ideal wells is the effect of the well's own volume (wellbore storage) on the pumping (build-up) tests—i.e., the well radius is not negligible and must be considered in an evaluation. At the beginning of the hydrodynamic tests on the well (pumping and build-up), when the water is pumped from the wellbore's own volume or the well is filled after stop pumping, this phenomenon affects the shape of the drawdown curve as a function of time until the pumping rate (or inflow into well) Q_{ws} from the well volume is equal to zero. In more detail, Papadopoulos and Cooper (Pasandi, Samani, & Barry, 2008) (for groundwater) and Ramey (for petroleum engineering) (Ramey & Agarwal, 1972) described and discussed the impact of the well volume on the pumping test during the first part of a pumping (build-up) test. The effect of the well radius (wellbore storage) on dimensionless drawdown gradually diminishes (Figure 1) as the time of pumping increases. Figure 1 shows the relationship between the pumped amount from the well volume, Q_{ws} , and the inflow rate from the aquifer, Q_{aq} , as a function of time.

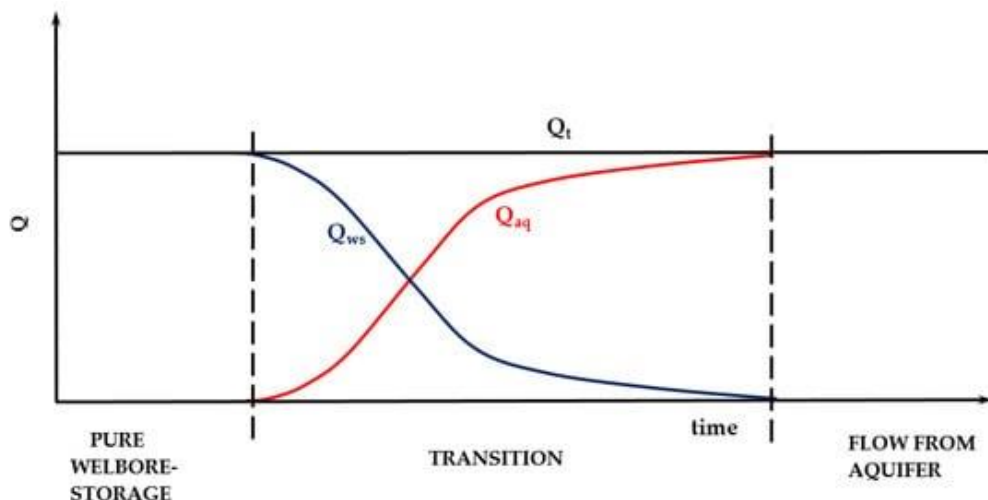


Figure 1. Pumping rate from wellbore storage, Q_{ws} , and groundwater inflow rate from aquifer, Q_{aq} , as a function of time.

Ramey (Chen & Lan, 2009), (Ramey H. J., 1970) states that, for the start of a pumping test (from several seconds to approximately several minutes, depending on the well diameter and pumping rate), a straight line with the “unit slope” can be found in the pumping test graph ($\log s$ vs. $\log t$) (Figure 2) (i.e., the deviation of the straight line

from the horizontal axis is 45°). The “straight line” with the “unit slope” lasts until all the water is pumped from the well’s volume. According to (Ramey H. J., 1970), we can determine the unit factor of the wellbore storage, C , from the following equation:

$$C = Q \frac{t_B}{S_B} \tag{II - 8}$$

where t_B is time for the arbitrarily selected point B on the “unit” slope line (**Figure 2**) [T], and s_B is the drawdown at time t_B [L].

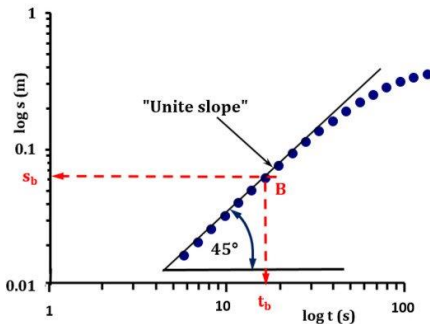


Figure 2. Graph $\log s$ vs. $\log t$ at the beginning of the pumping test when the water is pumped only from the wellbore’s own volume.

Using Equation (II - 6), the dimensionless coefficient of wellbore storage, which is one of the basic characteristics of the initial pumping test section, is determined. This parameter affects the shape of the drawdown curve during the pumping test during the time before reaching Cooper–Jacob’s semilogarithmic straight line, when the effect of water in the well volume disappears completely. The dimensionless storage coefficient can be expressed from Equation (II - 6) in the following form:

$$C_D = \frac{Q \frac{t_B}{s_B}}{2 \pi r_w^2 S} \tag{II - 9}$$

Additional Resistance (Skin Effect)

The drawdown of the water level in a “real” well depends on the resistance of the aquifer and the so called “additional losses” or resistance generated in the well, on its walls, and in the vicinity of the well. The term “additional resistance” refers to the sum of the phenomena that result in deviations of the measured values of water drawdown in a “real” well compared to the theoretical drawdown obtained under the assumption of an “ideal” model of water flow to a complete well (this is the case for additional

resistance, and the actual borehole volume will not be reflected in the course of the inflow test (i.e., the reduction in this volume is not affected). The drawdown in the water level (or increase) measured at the pumping well (or recharge well) is, then, greater than the calculated drawdown (or increase) in the borehole, which would cause a hydraulic intervention through a hydraulically perfect well without this additional resistance. Additional resistance in the well and its surroundings increase in the following ways (Houben & Treskatis, 2007):

a) by clogging of pores (s_1) with e.g. a fine material, which reduces the flow rate of the porous environment or disrupts the original internal structure of the porous environment in the vicinity of the wellbore during its digging and equipping (it decreases porous environment permeability) in rotary drilling, the result of which is so-called sludge bark, or in the case of impact drilling, the porous environment in the vicinity of the well is compacted, thereby reducing throughput (Adebayo & Bageri, 2019), (Elkatatny, Jafarov, Al-Majed, & Mahmoud, 2019) , (Iscan, Kok, & Bagci, 2007).

b) Through a reduction of the wellbore wall cross-section (s_2) for water inflow where the borehole wall is formed by a filter, perforated casing etc. by trapping rock particles or backfill in filter openings, including chemical incrustation and blockage of filter openings by microorganisms and bacteria (Ralph & Stevenson, 1995), (Houben G. , 2003) , (Patel & Singh, 2016).

c) via the friction (s_3) of water on the borehole walls and its internal friction (this group also includes additional resistances arising from the turbulent flow regime of the water inside the borehole and turbulent flow in the aquifer, especially in the vicinity of the pumping well

d) where appropriate, other types of additional resistances occur.

The drawdown due to the effect of additional resistances is expressed (Figure 3)

$$s_{skin} = s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n ; \text{ so we can write } s_{skin} = \sum_{i=1}^n s_i \quad (II -10)$$

where s_{skin} is the total additional drawdown in the well (“the skin drawdown”) caused by the additional resistance in the well and its immediate vicinity (in the so-called skin zone). The separation of the individual additional types of resistance involved in the skin effect is very problematic; therefore, the total dimensionless additional resistance coefficient, S_F (in the petroleum literature, referred to as the skin factor), is commonly used to express the total additional resistance. The total drawdown of the water level measured in the borehole during the pumping test can be expressed (when neglecting the additional resistance resulting from the turbulent flow regime) by the relation:

$$s_w = s_{te} + s_{skin} \quad (II - 11)$$

where s_w is the total drawdown in the pumping well [L]; s_{te} is the theoretical drawdown of the water level in an “ideal” well (zero additional resistances) [L]; and s_{skin} is the additional drawdown of water in the wellbore due to additional resistance [L].

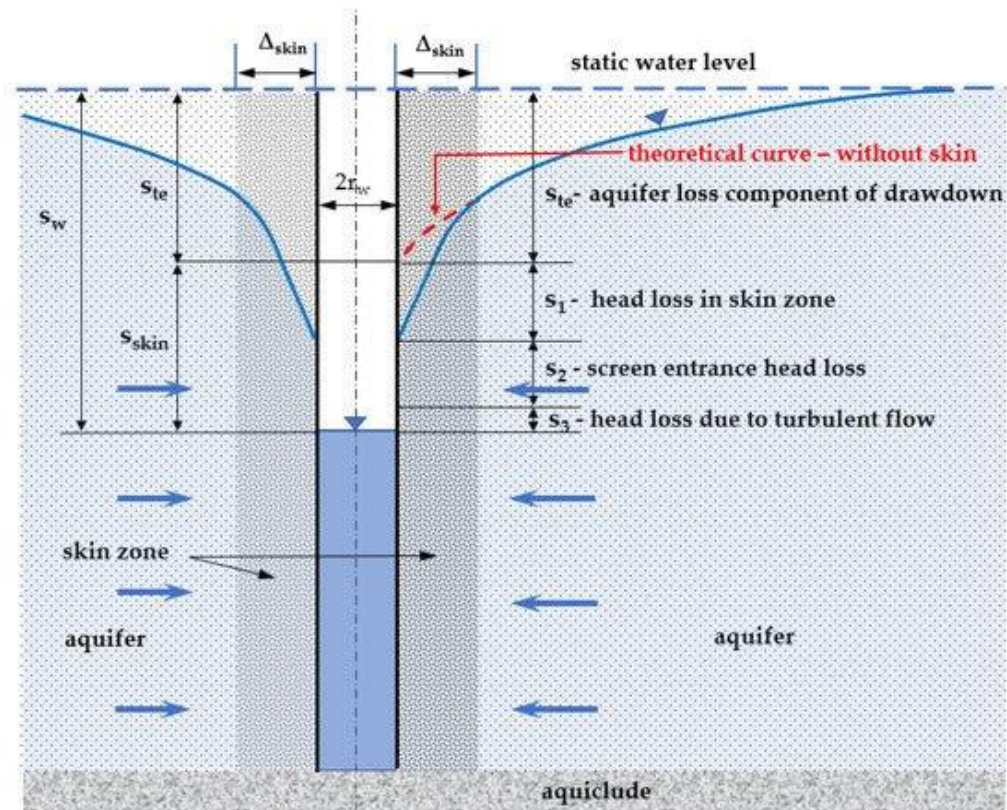


Figure 3. Real well: various head losses in a pumped well.

Neglecting the portion of the drawdown that follows from the turbulent flow regime, s_3 (its share in the total additional drawdown is negligible), the magnitude of the additional drawdown caused by additional resistance is dependent on the pumping rate, Q , with the linear relationship (Van Everdingen, 1953)

$$s_{skin} = \frac{Q}{2\pi T} S_F \quad (II - 12)$$

where S_F is the dimensionless coefficient of additional resistance (skin factor) [-]; and s_{skin} is the drawdown caused by additional resistance [L].

The effect of additional resistance will be included in the total drawdown on the “real” well when the flow is at a tight level.

(a) For the steady flow (Van Everdingen, 1953), we can write

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{R}{r_w} + S_F \right) \quad (II - 13)$$

where R is the radius of well influence [L]; r_w is the wellbore radius [L]; and S_F is the coefficient of additional resistance (skin factor) [-].

(b) The unsteady flow regime (using the Cooper–Jacob semi-logarithmic method because this part no longer shows the influence of wellbore storage) can be expressed as

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} (\ln 2.246 \cdot t_D + 2S_F) \quad (II - 14)$$

After converting the natural logarithm to a normal logarithm, we obtain the following equation:

$$s_w = \frac{2.303 Q}{4\pi T} (\log (2,246 t_D) + 2S_F) \quad (II - 15)$$

If the Cooper–Jacob semilogarithmic straight line is reached in the semilogarithmic graph of the pumping test, we can use Equation (II-15) to evaluate the coefficient of additional resistance. After expressing S_F and adjusting, we obtain

$$S_F = \frac{2\pi T s_w}{Q} - \frac{1}{2} (\log t + \log \frac{T}{r_w^2 S} + 0.8091) \quad (II - 16)$$

Deriving the New Correlation to Evaluate the Skin Factor from the First Straight Line

For a real well, we refer to a wellbore and account for the existence of additional resistance in the well and in its immediate surroundings (as defined above) in comparison with an ideal wellbore. In the initial portion of the hydrodynamic test, we also include the influence of the volume of wellbore in the calculations. To derive the new correlation, the equation of radially symmetrical groundwater flow to the wellbore under an unsteady state regime was used, transformed into dimensionless parameters with the initial and boundary conditions defined according to the petroleum engineering

standards of Agarwal et al. (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970). The basic equation for the radial-symmetric flow of groundwater to the wellbore has a similar shape (e.g., (Watlton, 2007), (Jargon, 1976) , (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970) , (Pech P. , 2003))

$$\frac{\partial^2 s_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial s_D}{\partial r_D} = \frac{\partial s_D}{\partial t_D} \quad (II - 17)$$

The assumptions for solving Equation (II-17) are the same as those for the Theis solution for an ideal well. In a flow in a confined aquifer to a complete well, the following parameters are true:

- The gravitational forces are negligible;
- A constant density and viscosity of water;
- The aquifer has an infinite areal extent;
- The pumping well penetrates the full thickness of the aquifer;
- The flow to the pumping well is horizontal;
- The flow is unsteady;
- The diameter of a pumping well is very small (negligible), allowing the storage in the well to be neglected;
- The well is pumped with constant rate Q ;
- The aquifer is horizontal and bounded on the bottom and top by impermeable layers (a confined aquifer);
- The aquifer flow to the pumped well is radial and laminar, so Darcy's law is applied;
- The confined aquifer is homogeneous and isotropic;
- The height of an aquifer (where the flow to the well is constant and has a size b transmissivity, T , and storability (aquifer storage), S) is constant over time and space;
- The water supply from the aquifer to the well changes during the pumping test from $Q_{aq} = 0$ to the final inflow, $Q_{aq} = Q = \text{const.}$;
- Before pumping begins (i.e., for $t = 0$), the hydraulic head is constant in all points of the aquatic environment and equals H ; this also applies to the water level at a well.

Moreover, it is assumed (for a "real" well) that:

- The well possesses its final volume, and, at the beginning of pumping, the effect of the water volume in the wellbore influences the drawdown and must be considered;

- The wellbore storage coefficient is constant and does not change during pumping;
- The influence of additional resistance occurring in the wellbore itself and in its immediate vicinity is considered (the width of the perpendicular zone can reach up to about 2–7 m).

The initial and boundary conditions (in dimensionless parameters) for a real well have the shape (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970) of

$$s_D(r_D, 0) = 0 \quad (II - 18)$$

$$s_D(r_D, t_D) = 0 \quad \text{for } r_D \rightarrow \infty \quad (II - 19)$$

for additional resistance,

$$s_{wD} = s_D + \left(r_D \frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right)_{r_w} S_F \quad (II - 20)$$

and for wellbore storage,

$$C_D \frac{ds_D}{dt_D} - \left(r_D \frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right) = 1 \quad (II - 21)$$

To solve basic Equation (II-17) with the initial and boundary conditions (Equations (II-18)–(II-21)), a one-sided Laplace transform was used to convert the partial differential equation in the dimensionless parameters (17) to a normal differential equation. We used a transformation function that provides a shape for the solved case in the following form (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970)

$$F(p) = \mathcal{L}(f(t_D)) = \int_0^{\infty} f(t_D) e^{-p t_D} dt_D \quad (II - 22)$$

This is an integral transformation with kernel $\exp(-pt_D)$, where p is a complex variable; and $F(p)$ is the image of the given object, $f(t_D)$. In Laplace space, the solution of Equation (II-17) has the following form

$$\overline{s_D} = \frac{K_0 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) + S_F p^{\frac{1}{2}} K_1 \left(p^{\frac{1}{2}} \right)}{p \left[p^{\frac{1}{2}} K_1 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) + C_D p^{\frac{1}{2}} \left(K_0 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) + S_F p^{\frac{1}{2}} K_1 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) \right) \right]} \quad (II - 23)$$

where $\overline{(sD)}$ is the solution of the dimensionless drawdown for rD and tD in Laplace space; p is a complex variable; K_0 is the modified Bessel function of the second kind with an order of zero (imaginary argument); K_1 is the modified Bessel function of the second kind with an order of one (imaginary argument); CD is the dimensionless coefficient of wellbore storage; and SF is the dimensionless coefficient of additional resistance (skin factor). When evaluating K_0 and K_1 , dimensionless drawdown values were taken from (Abramowitz & Stegun, 1972). For the inverse Laplace transformation, the Stehfest algorithm 368 (Stehfest, 1970) was used, which is very often used in petroleum engineering and groundwater hydraulics (Watlton, 2007), (Yang & Yeh, 2005). From (Watlton, 2007) we can obtain

$$f(t_D) = \sum_{j=1}^{\frac{n}{2}} X_j \left(\frac{n}{2}\right) P_{\left(\frac{n}{2}+1-j\right)} \quad (II - 24)$$

where,

$$X_j \left(\frac{n}{2}\right) = \frac{(-1)^{(j-1)}}{\left(\frac{n}{2}\right)!} \left(\frac{n}{2}\right)_j \left(\frac{n}{2} + 1 - j\right)^{\left(\frac{n}{2}-1\right)} \quad (II - 25)$$

$$P_n = \frac{\ln 2}{t_D} \frac{(2n)!}{n!(n-1)!} \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (-1)^i F\left((n+i) \frac{\ln 2}{t_D}\right) \quad (II - 26)$$

To evaluate s_D from Equation (Hawkins Jr., 1956) by means of Equations (Park & Zhan, 2002), (Barua & Bora, 2010) and (Jargon, 1976), value n is 10, as used in (Watlton, 2007). Stehfest's algorithm 368 was used to calculate the dimensionless drawdown, which depends on the skin factor and wellbore storage. Calculations were done for skin factor $SF = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12.5, 15, 20, 30, 35, 40, 50$, and for dimensionless wellbore storage, $CD = 10, 50, 5 \times 10^2, 1 \times 10^3, 5 \times 10^3, 1 \times 10^4, 5 \times 10^4, 1 \times 10^5, 5 \times 10^5, 1 \times 10^6, 5 \times 10^6, \text{ and } 1 \times 10^7$. For clarity of the graphs, Figure 4 illustrates the dependencies of s_D on $\log t_D$ for $C_D = 1 \times 10^2, 1 \times 10^4, 1 \times 10^7$, and $SF =$

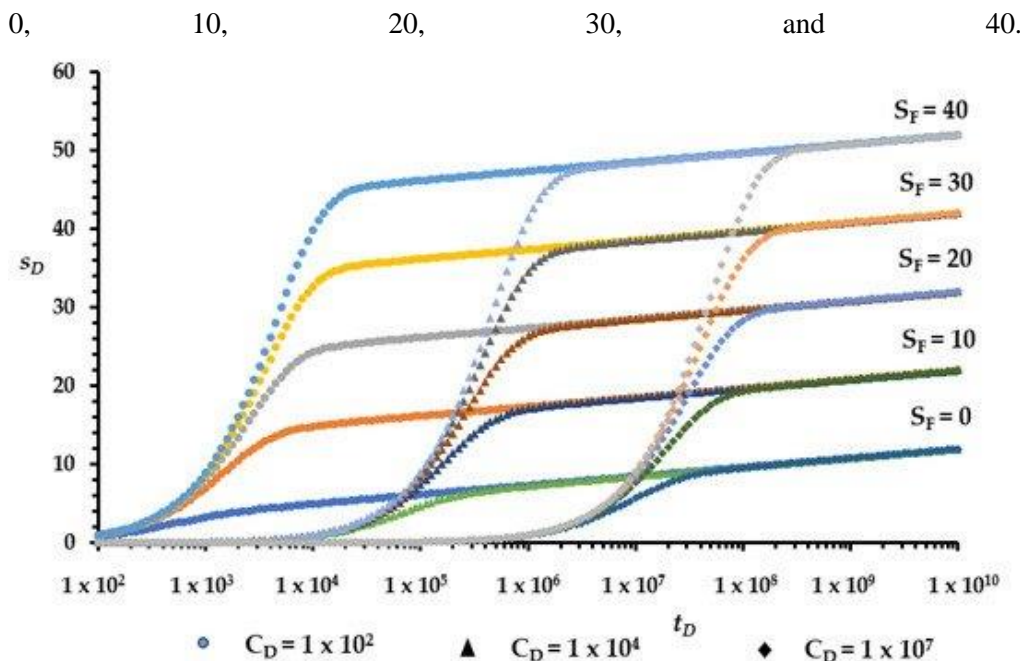


Figure 4. Demonstration of dimensionless drawdown s_D vs. $\log t_D$ (for the selected values, S_F and C_D).

As shown in Figure 4 and also in Figure 5 (see also (Chu, García-Rivera, & Raghavan, 1980)), the graphs always present two straight lines. The “first straight line” segment appears in the graph in its initial part, i.e., at the time when the drawdown at the well (at a constant rate Q) is affected both by the additional resistance on the well and by its vicinity and the well volume (wellbore storage). The slope of the first straight line section is denoted i_{zD} . The “second straight line” in the semilogarithmic plot of s_D vs. $\log t_D$ appears only in the late periods of the graph and corresponds to the area that can be evaluated by the Cooper–Jacob semilogarithmic approximation (Cooper & Jacob, 1946). The same two straight lines can be observed in field pumping tests on the semilogarithmic graph drawdown of s vs. $\log t$ (Chu, García-Rivera, & Raghavan, 1980).

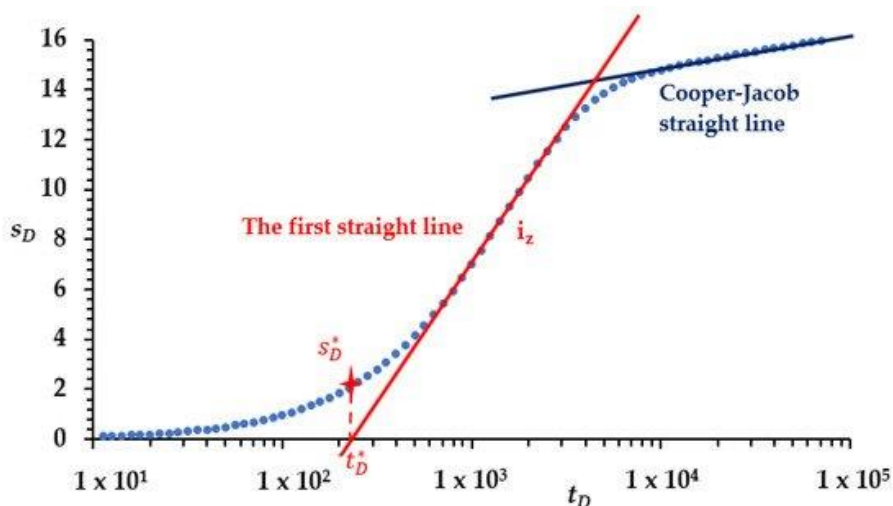


Figure 5. Semilogarithmic graph s_D vs. $\log t_D$ with two straight lines.

Based on **Figure 4**, in the early-portion of the pumping test, which is influenced by both factors (skin effect and wellbore storage), by increasing the skin factor, the slope of the first straight line i_{zD} section increases; also, if the dimensionless wellbore storage, C_D , increases then the curves s_D vs. $\log t_D$ are moved in a positive direction (i.e., to the right).

To evaluate the additional resistances from the early-portion of the pumping test (until the Cooper–Jacob semi-logarithmic section is unable to be reached), a drawdown value, s_{D}^* , for dimensionless time t_{D}^* was selected, which is the time of the intersection of the first straight line with the timeline axis (**Figure 5**). Dimensionless drawdown s_{D}^* depends on the dimensionless wellbore storage C_D and the coefficient of additional resistance, S_F . In this way, we can find a correlation between the dimensionless drawdown, s_{D}^* ; the dimensionless wellbore storage, C_D ; and the skin factor, S_F .

Results

We evaluated the dimensionless drawdown values s_D^* for the dimensionless wellbore storage, $C_D = 1 \times 10^2, 5 \times 10^2, 1 \times 10^3, 5 \times 10^3, 1 \times 10^4, 5 \times 10^4, 1 \times 10^5, 5 \times 10^5, 1 \times 10^6, 5 \times 10^6$, and 1×10^7 and for the dimensionless skin factor $S_F = 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90$, and 100 (see **Table 1**).

Table 1. Dimensionless drawdown, s_D^* , for the selected skin factors, S_F , and the dimensionless wellbore storage, C_D .

SF	CD									
	1×10^2	5×10^2	1×10^3	5×10^3	1×10^4	5×10^4	1×10^5	5×10^5	1×10^6	5×10^6
0	0.6	0.73	0.79	0.93	0.99	1.13	1.19	1.33	1.39	1.52
2	0.94	1.08	1.14	1.28	1.33	1.47	1.53	1.67	1.73	1.87
4	1.28	1.42	1.48	1.62	1.67	1.82	1.86	2.01	2.07	2.20
6	1.62	1.76	1.81	1.96	2.02	2.15	2.21	2.35	2.41	2.54
8	1.96	2.10	2.16	2.30	2.36	2.49	2.55	2.69	2.74	2.88
10	2.31	2.44	2.50	2.64	2.69	2.83	2.89	3.02	3.08	3.21
15	3.14	3.26	3.34	3.47	3.53	3.66	3.73	3.84	3.92	4.05
20	3.98	4.12	4.18	4.31	4.37	4.50	4.56	4.70	4.76	4.89
25	4.82	4.95	5.01	5.14	5.20	5.34	5.40	5.53	5.58	5.71
30	5.64	5.78	5.84	5.98	6.04	6.17	6.22	6.35	6.40	6.54
35	6.47	6.61	6.67	6.81	6.87	7.00	7.05	7.18	7.23	7.37
40	7.30	7.44	7.50	7.64	7.70	7.83	7.88	8.01	8.06	8.20
45	8.12	8.27	8.33	8.46	8.52	8.66	8.71	8.84	8.90	9.03
50	8.96	9.09	9.14	9.28	9.34	9.48	9.54	9.68	9.73	9.86
60	10.62	10.76	10.82	10.95	11.00	11.13	11.19	11.32	11.37	11.49
70	12.28	12.41	12.46	12.59	12.65	12.77	12.82	12.95	13.01	13.15
80	13.93	14.06	14.11	14.24	14.29	14.42	14.47	14.60	14.66	14.80
90	15.58	15.71	15.76	15.89	15.94	16.07	16.12	16.25	16.30	16.43
100	17.13	17.36	17.33	17.55	17.54	17.73	17.74	17.91	17.93	18.09

Figure 6 shows the plot of dimensionless drawdown, s_D^* , vs. the skin factor, S_F (for dimensionless wellbore storage $C_D = 10^5$). For the sake of clarity, only the values $S_F = 0, 20, 30,$ and 50 are used in **Figure 6**.

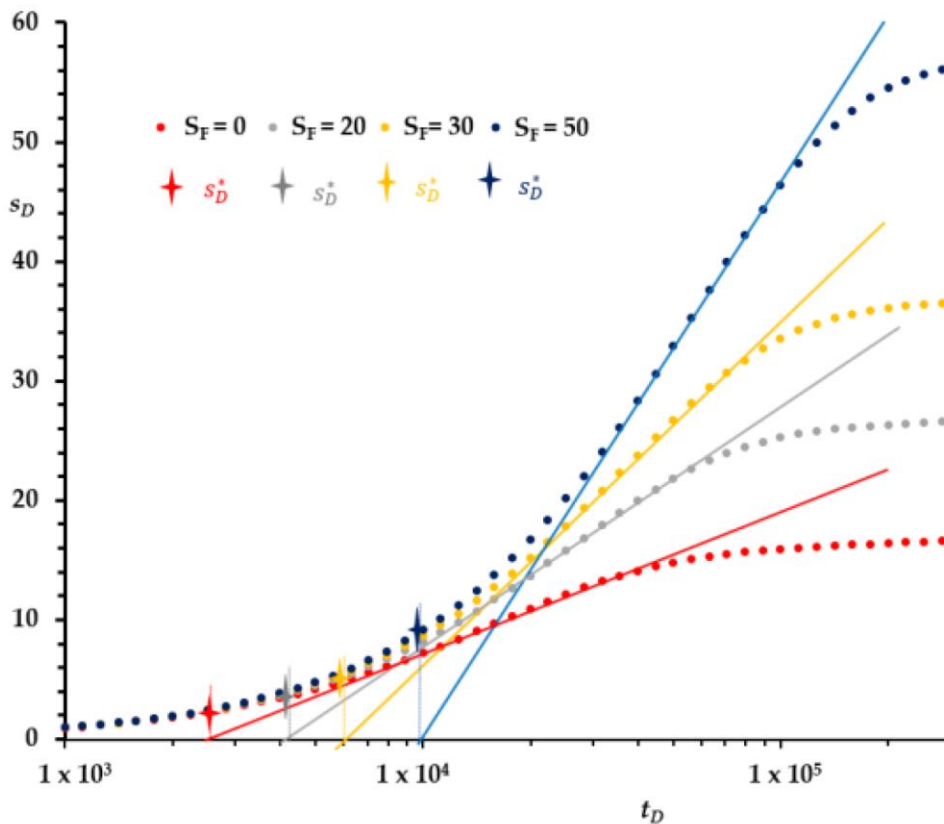


Figure 6. Example of drawdown s_D^* from graph s_D vs. $\log t_D$ (for $S_F = 0, 20, 30, 50,$ and for $C_D = 1 \times 10^5$).

Figure 7 shows an example of the dependences of dimensionless drawdown, s_D^* , vs. the skin factor, S_F , for the selected values of C_D .

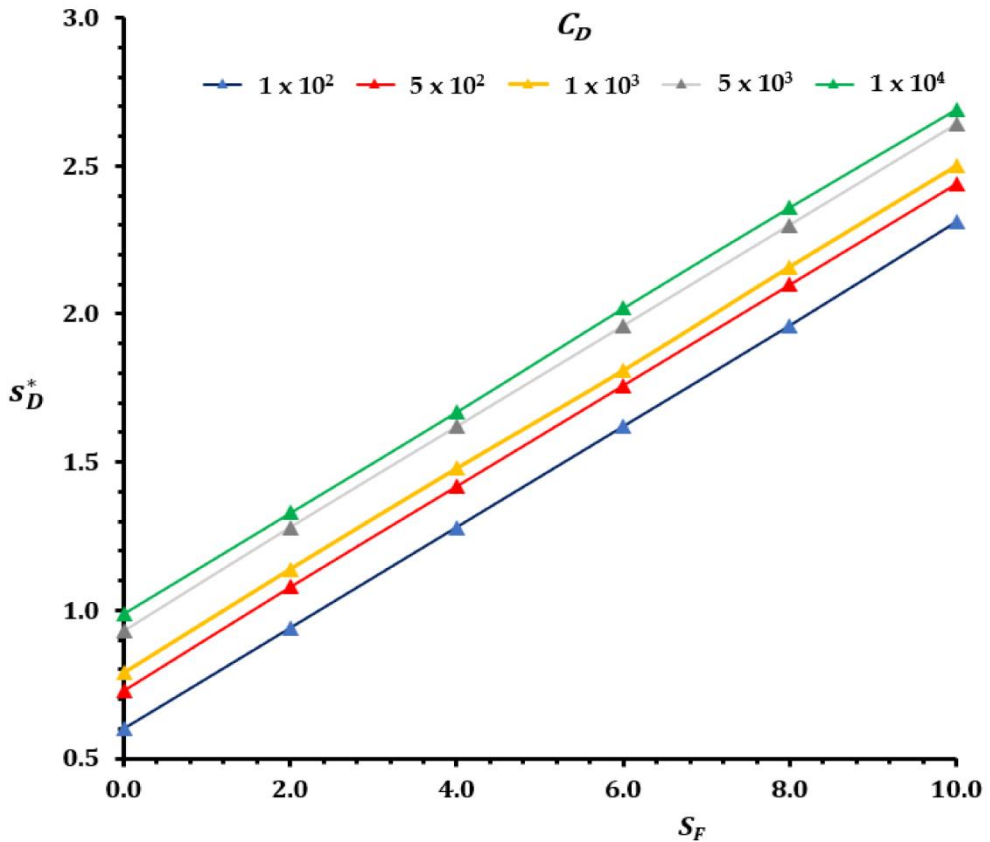


Figure 7. Dependence s_D^* vs. skin factor, S_F , for values of C_D (1×10^2 , 5×10^2 , 1×10^3 , 5×10^3 , and 1×10^4) and S_F (0, 2, 4, 6, 8, and 10).

Figure 7 shows that the dependences of s_D^* and S_F are a set of parallel straight lines. The equations for the system of straight lines can be expressed by:

$$s_D^* = a_{si}S_F + b_{si} \quad (II - 27)$$

where coefficients a_{si} and b_{si} for all straight lines (as shown in **Figure 7**) were evaluated by means of the least squares method. Based on **Figure 7** and **Table 1**, it follows that these coefficients are a function of the dimensionless skin factor, S_F . The dependence $a_{si} = f(S_F)$ and also the dependence.

$b_{si} = f(S_F)$ were evaluated by similar equations, as stated in (Adebayo & Bageri, 2019):

$$a_{si} = \frac{n \sum_{i=1}^n S_{Fi} S_{Di}^* - \sum_{i=1}^n S_{Fi} \sum_{i=1}^n S_{Di}^*}{n \sum_{i=1}^n S_{Fi}^2 - \left(\sum_{i=1}^n S_{Fi} \right)^2} \quad (II - 28)$$

For all values of the dimensionless wellbore coefficient, C_D , the coefficient a_{si} was constant and equal to 0.166.

The values of coefficient b_{si} for the given values of dimensionless wellbore storages, C_D , were evaluated in the same way as those in (II-28). The equation for the solved dependence has the form

$$b_{si} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{Fi}^2 \sum_{i=1}^n S_{Di}^* - \sum_{i=1}^n S_{Fi} \sum_{i=1}^n S_{Fi} S_{Di}^*}{n \sum_{i=1}^n S_{Fi}^2 - \left(\sum_{i=1}^n S_{Fi} \right)^2} \quad (II - 29)$$

The evaluated values of coefficient b_{si} , using Equation (II-29) for dimensionless C_D drift, are shown in **Table 2**.

Table 2. b_{si} coefficients for the dimensionless wellbore coefficient, C_D .

N.	C_D	b_s
1	1.0×10^2	0.6448
2	5.0×10^2	0.7690
3	1.0×10^3	0.8420
4	5.0×10^3	0.9754
5	1.0×10^4	1.0375
6	5.0×10^4	1.1689
7	1.0×10^5	1.2325
8	5.0×10^5	1.3644
9	1.0×10^6	1.4272
10	5.0×10^6	1.5581
11	1.0×10^7	1.6195

Based on a plot, the dependence of the coefficient b_{si} vs. the logarithm of the dimensionless wellbore storage coefficients represented by C_D , from **Table 2** was found to be linear (see **Figure 8**).

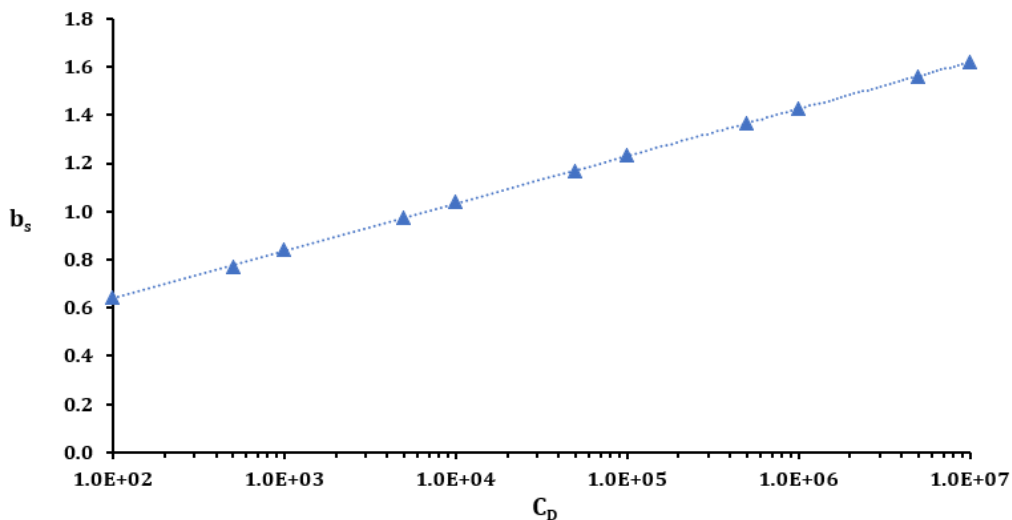


Figure 8. Graph of coefficients b_{si} vs. $\log C_D$.

The equation expressing a linear relationship b_s vs. $\log C_D$ has the form

$$b_s = b_{1s} \log C_D + b_{2s} \quad (II - 30)$$

To evaluate the coefficients b_{1s} and b_{2s} we use the modified Equations (II-28) and (II-29)

$$b_{1s} = \frac{n \sum_{i=1}^n (\log C_D)_i b_{si} - \sum_{i=1}^n (\log C_D)_i \sum_{i=1}^n b_{si}}{n \sum_{i=1}^n (\log C_D)_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\log C_D)_i \right)^2} \quad (II - 31)$$

$$b_{2s} = \frac{\sum_{i=1}^n (\log C_D)_i^2 \sum_{i=1}^n b_{si} - \sum_{i=1}^n (\log C_D)_i \sum_{i=1}^n (\log C_D)_i b_{si}}{n \sum_{i=1}^n (\log C_D)_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\log C_D)_i \right)^2} \quad (II - 32)$$

The values of b_{1s} and b_{2s} were evaluated via Equations (II -31) and (II - 32)

$b_{1S} = 0.1908, b_{2S} = 0.2681.$

After substituting the calculated coefficients into Equation (II-27), we obtain the final equation for s_D^* in the form

$$s_D^* = 0,166S_F + 0,1908 \log C_D + 0,2681 \quad (II - 33)$$

After substituting the dimensionless parameters Equations (II-6) and (II-7) into Equation (II-33) and expressing the coefficient of additional resistances, we obtain the resulting equation for the skin factor in the form

$$S_F = \frac{1}{0,166} \left(\frac{2\pi T s^*}{Q} - 0,1908 \log \frac{C}{2\pi r_w^2 S} - 0,2681 \right) \quad (II - 34)$$

Field Test: Rehabilitation of the Dug S-V well Veselí Nad Lužnicí

We applied the derived method for evaluating mechanical rehabilitation and calculating the value of the skin factor from the early-portion of pumping tests at the well S-Vwell, which is situated near the village of Veselí nad Lužnicí (see **Figure 9**).

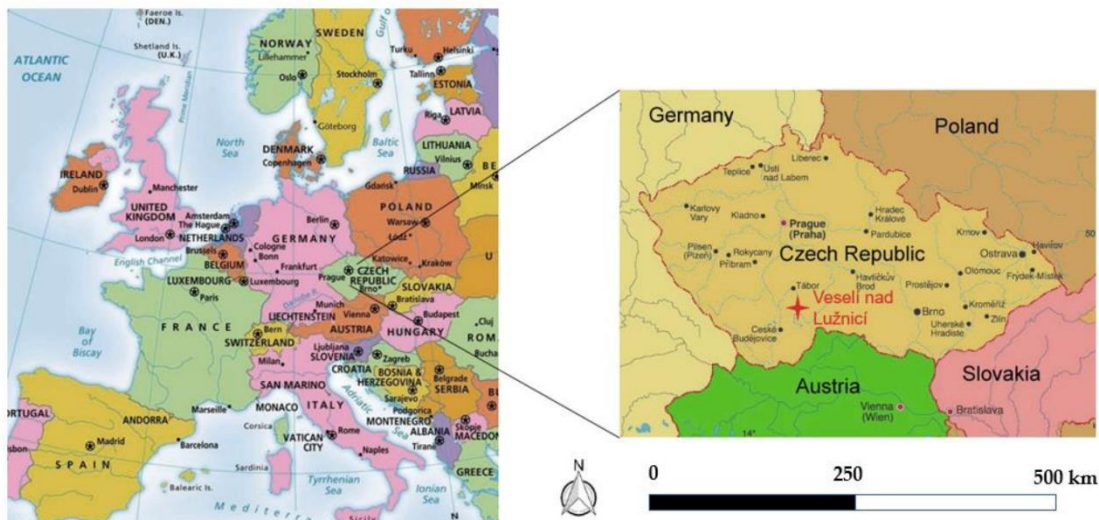


Figure 9. Location of the well S-V near Veselí/n. Lužnicí.

Pumping tests were carried out before rehabilitation, after rehabilitation, and to verify the well's ageing after one year of exploitation of the well. The pumping tests were carried out at a constant pumped rate under an unsteady flow regime.

The dug well S-V has an inside diameter of 3 m. The well depth is 10 m, and the position of the water level below the terrain is approximately 1.9 m. For the geological profile, see **Figure 10**.

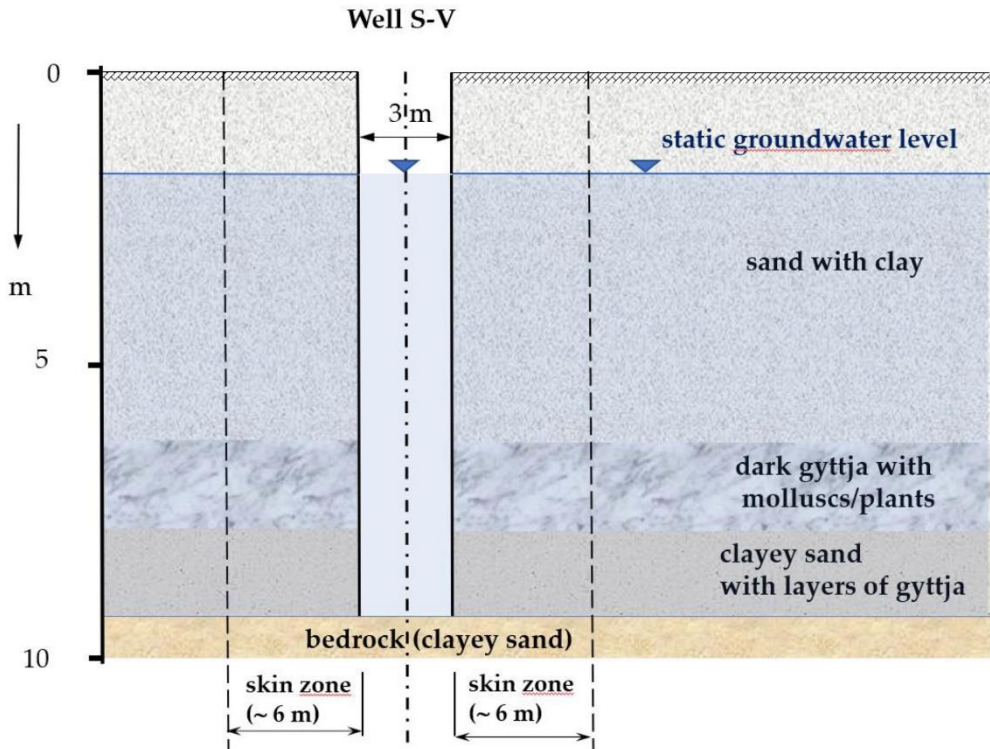


Figure 10. Cross-section of the S-V well with geology (Hošek, Pokorný, Prach, Šída, & Křížek, 2018).

Based on the long-term pumping tests, when the late portion evaluable by the Cooper–Jacob semilogarithmic approximation [2] was reached, the hydraulic parameters of the aquifer were evaluated with a coefficient of transmissivity $T = 0.00715 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and a storage coefficient $S = 0.074$.

Before rehabilitation, we created observation wells R-1 to R-4, which were 80 mm in diameter with average depths of 9.0, and wells P-1 to P-6, which were 50 mm in diameter, with the same depth of 9.0 m (see **Figure 11**).

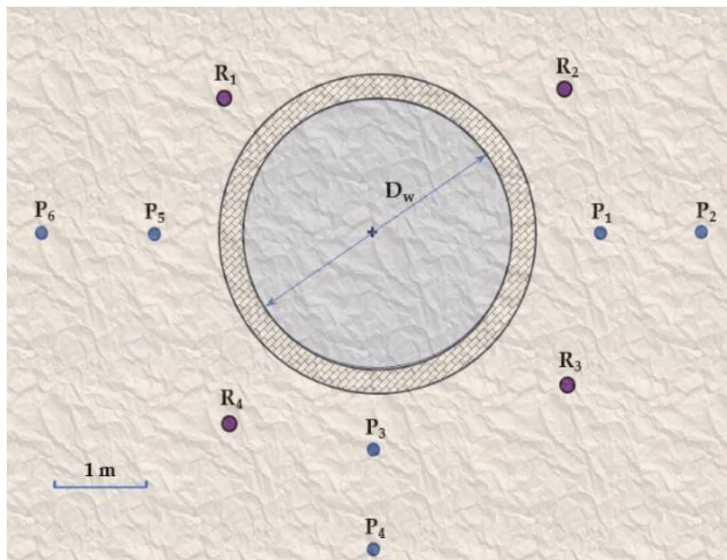


Figure 11. Pumping S-V well with the location of the observation boreholes, P_i and R_i .

For the pumping tests, the submersible pump was placed approximately 1.5–2.0 m above the bottom of the well, with a displacement J_s of 80 mm, an elbow with a sampling cock, and a water meter J_s of 80 mm, with spool and waste piping from chemlon hoses. The waste pipe was connected outside the protective zone of the water source to the adjacent sandy part. For the evaluation of the pumping test, the observation well P_7 was located outside the area affected by additional resistance with an internal diameter of 50 mm. The shape of the graph of the pumping test before rehabilitation showed that the yield of the well was very low (a large increase on the well's shell subsequently emerged from the evaluation). The casing of the well had a large number of inlet openings, and the inspection showed that the inlet openings were, for the most part, clogged with sand, clay, and pebbles, or were overgrown with hard increments. The environment behind the borehole of the well (according to observation of the water level in the casing boreholes) was rounded (low permeability). Based on these findings, the following rehabilitation procedure was performed. First, the blasting of observation boreholes P_i and R_i was carried out using cleaning heads. Thereafter, pressure regeneration was carried out using the observation wells, which had an effect on the well surroundings. After the water level was lowered to approximately 2.5 m above the bottom, mechanical cleaning of the overgrown inlet holes was carried out in the well. At the same time, pressure regeneration of the surroundings of the well was carried out using pressure surges in the observation wells made especially for this purpose, and the impurities were drained from the inside of the well.

The pumping tests were performed such that they could be evaluated by methods of the unsteady flow regime—i.e., the time shape of the drawdown in the well S-V and in the observation well P6 was measured while pumping a constant amount of water from the well. The starting level was about 1.9 m from the well edge. The pumping test before rehabilitation lasted 180 min at a constant pumping rate of 3.35 l/s, and the drawdown in the well was $s_w = 4.5$ m. After rehabilitation, a pumping test of 240 min at a pumping rate of 3.7 l/s was performed, and the drawdown at the end of pumping was $s_w = 1.03$ m. One year after the rehabilitation was performed, a pumping test of 75 min at a constant pumped rate of 3.52 l/s was carried out to determine the development of the well's ageing. The drawdown at the end of the pumping test was $s_w = 1.29$ m (see **Table 3**). During the pumping tests, water samples were taken for complete chemical and bacteriological analyses (alkalinity, acidity, pH, and fixation of iron (II)), which were performed on site.

Table 3. Pumping tests at S-V well in Veselí nad Lužnicí before rehabilitation (a), after rehabilitation (b), and one year after rehabilitation (c).

(a)			(b)		(c)		
N.	Time $t(s)$	Drawdown $s(m)$	Time $t(s)$	Drawdown $s(m)$	N.	Time $t(s)$	Drawdown $s(m)$
1.	130	0.02	30	0.01	1.	60	0.08
2.	215	0.04	45	0.025	2.	120	0.13
3.	240	0.05	60	0.03	3.	180	0.16
4.	300	0.08	90	0.045	4.	300	0.21
5.	420	0.14	150	0.08	5.	600	0.305
6.	560	0.20	180	0.09	6.	900	0.4
7.	800	0.28	240	0.115	7.	1200	0.47
8.	900	0.33	300	0.135	8.	1800	0.62
9.	1180	0.46	600	0.25	9.	2700	0.75
10.	1800	0.67	900	0.34	10.	3600	0.84
11.	2700	1.02	1200	0.415	11.	4500	0.9
12.	3600	1.25	1500	0.475	12.	9000	1.09
13.	5600	1.76	1800	0.54	13.	15,000	1.18
14.	7200	2.20	2100	0.585	14.	27,000	1.25
15.	10,800	2.78	2700	0.65	15.	50,000	1.27
16.	14,200	3.14	3600	0.72	16.	80,000	1.285
17.	20,000	3.51	5400	0.82			
18.	30,000	3.91	7200	0.875			
19.	44,000	4.15	10,800	0.955			
20.	70,000	4.32	14,400	0.98			
21.	100,000	4.41	25,000	1.01			
22.	200,000	4.47	40,000	1.02			
23.	400,000	4.50	72,000	1.03			

The following graphs (**Figure 12** a–c) show the values of drawdown over time for the pumping tests. Based on the semilogarithmic dependencies, the drawdown vs. the logarithm of time was subtracted by the magnitude of the drawdown for the intersection time of the first straight line (whose slope is i_z) segment with the timeline axis (see **Figure 5**).

A New Method for the Evaluation of Well Rehabilitation from the Early Portion of a Pumping Test

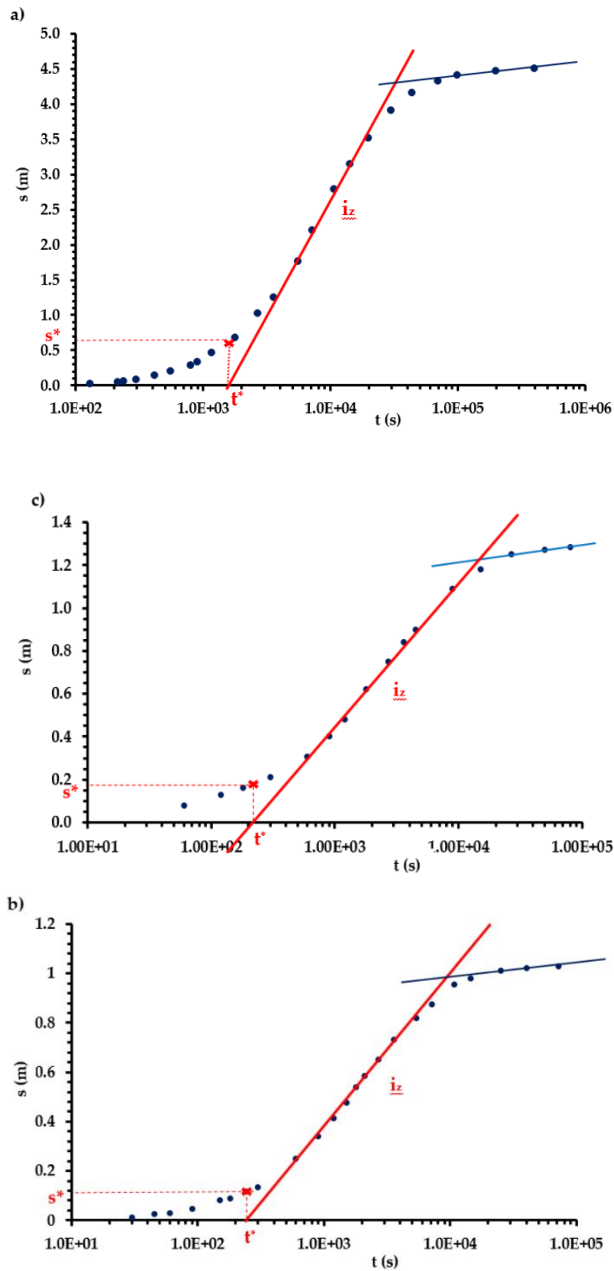


Figure 12. Semilogarithmic graphs of the pumping tests on the S-V well (a) before rehabilitation, (b) after rehabilitation, and (c) one year after rehabilitation.

Using the derived relationship (Equation (II-34)), the skin factor values were evaluated, and the drawdown caused by the additional resistance (according to van Everdingen (Van Everdingen & Hurst, 1949)) was determined. This drawdown corresponds to the additional drawdown at a steady flow to the well. The skin factor values were also evaluated using the Cooper–Jacob semilogarithmic method, since second straight lines were achieved in all three pumping tests. Skin factors were determined using Equation (II-16).

The pumping tests showed that the rehabilitation resulted in a reduction of the skin factor from 48 to 6.8, which indicates the effectiveness of the selected rehabilitation intervention. Furthermore, to evaluate the ageing of the well, a pumping test was carried out after one year of operation (i.e., one year after the rehabilitation). The skin factor increased from 6.8 to by 10.8 (see **Table 4**), which proved the deterioration of the well’s condition after a year of operation post-regeneration.

Table 4. Results of evaluating the skin factor and additional drawdown—S-V well.

	Before rehabilitation	After rehabilitation	1 year after rehabilitation
Pumping rate, Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.00335	0.0037	0.00352
Pumping test duration (s)	400 000	72 000	80 000
s^* (m)	0.62	0.135	0.18
New method (Equation (II-34))	47	6.8	10.8
Cooper-Jacob method (Equation (II-16))	51	7.9	12
Difference (%)	8.4	15	11.1
Additional drawdown s_{skin} (Equation (II-12))	3.51	0.56	0.85

Discussion and Conclusions

In this paper, we derived a correlation of the dimensionless drawdown for the intersection time t_D^* of the first straight-line (see **Figure 3**) of the pumping test in a semilogarithmic graph as a function of the dimensionless wellbore storage, C_D , and the skin factor, S_F (Equation (II-12)). The derivation was undertaken by applying an approximate solution of the partial differential equation using dimensionless parameters for the symmetrical radial flow problem in an infinite confined aquifer with a constant thickness to the fully penetrating well, pumped with a steady flow rate. The

solution was obtained by using the Laplace transform in conjunction with the Stehfest algorithm 368, the approximate method for the numerical inversion of the solution in Laplace space. The skin factor, S_F , was evaluated from the early portion of pumping test data (the part of the pumping test before the Cooper–Jacob semilogarithmic straight-line was achieved) by means of Equation (II-34).

The skin factor from the semilogarithmic plot (s_w vs. $\log t$) of the early portion of the pumping test can be evaluated without using type curve matching. This new procedure is particularly useful when the early-time slope of the first straight-line has been observed. The usefulness of the derived correlation s^* (vs. S_F and C_D) has been demonstrated in the field example through the evaluation effect of mechanical rehabilitation at a S-V well (Veselí nad Lužnicí). The validity of this new method was checked by comparing the skin factor calculated by the new method with the Cooper–Jacob semilogarithmic method (Equation (II-16)) (see **Table 1**). We evaluated the differences between the skin factor determined from Equation (II-34) and that determined from Equation (II-16). Comparing these skin factors demonstrates that the estimate of S_F is in fair agreement with the other values. For the field example, the agreement is surprisingly good. The differences ranged between 7% and 12% (**Table 4**).

If the pumping test is too short to observe the Cooper–Jacob semilogarithmic straight line, then the derived method is applicable for evaluation of the skin factor; all other parameters must be known, but the pumping test should run long enough that s_w vs. $\log t$ can fully develop into “the first straight line” on the semilogarithmic plot. This method may be used when other techniques do not provide satisfactory answers or if the late-time portion of the pumping test is missing and the Cooper–Jacob method or type curve cannot be used. For the application-derived procedure, the storage coefficient and transmissivity of the aquifer must be known, but to evaluate the effects of rehabilitation on the well and accurately control age, this procedure is sufficient. We applied the stated method to several other evaluations of rehabilitation wells. In all instances, the results of the Cooper–Jacob method were as good as those in the previous field example comparisons. The differences were a maximum of 25% (in groundwater, this is very good agreement). However, the derived procedure presented in this paper is not proposed to replace the current methods used in groundwater hydraulics and petroleum engineering. To evaluate the skin factor from the initial pumping test section, it is necessary to record a decrease in the water level in the well at sufficiently short intervals immediately from the start of pumping. It is advisable to select a monitoring interval of 1 s until the beginning of the first straight line in the semilogarithmic chart, and then it is possible to observe the reduction in time steps of 5–10 s. This is very important for the application of the method. By correctly applying the derived method

and correctly determining the first straight line (the first straight line can be determined in almost all instances), the intersection time of the first slope with the log t axis can be determined with a high degree of confidence. The application of this method eliminates the main problem of the type curve method because lines of different types are often so similar that it is very difficult, and often impossible, to find conformity with the actual pump test curve. For this reason, quantitative information cannot be obtained with the same degree of accuracy as information obtained via calculations using conventional Cooper–Jacob approximations. Due to the cost of extended pumping tests, the modern trend has been towards the development of hydrodynamic tests for the pertinent analysis for early-period data for information obtained prior to the usual straight-line of the well test (Horne, 1990). These data can be analyzed using the “derived method” for economic or practical reasons. The method derived here contributes to the possible evaluation of the skin factor. The advantage of this method is that it can be used in cases where the application of other methods is difficult or even impossible.

his new technique is applicable to the interpretation of ground water-pumping tests. When deriving the groundwater flow, dimensionless parameters were used. The results could also be applied also to petroleum areas if the dimensionless parameters from (Tongpenyai & Raghavan, 1981) are used.

dimensionless pressure:

$$p_D^* = \frac{k h}{141.2 q B \mu} \Delta p^*$$

dimensionless intersection time

$$t_D^* = \frac{0.000264 k t^*}{\phi \mu c_t r_w^2}$$

dimensionless wellbore storage

$$C_D = \frac{5.615 C}{\phi c_t h r_w^2}$$

where k is the permeability (md), h is the formation thickness (ft), q is the flow rate (STB/D), B is the formation volume factor (RB/STB), μ is viscosity (cp), Δp is the pressure change (psi), ϕ is the porosity, c_t is the total compressibility (psi⁻¹), r_w is the wellbore radius (ft), and C is the wellbore storage coefficient (STP/psi).

With these dimensionless parameters for petroleum engineering, Equation (II-33) is:

$$p_D^* = 0,166S_F + 0,1908 \log C_D + 0,2681$$

From this equation, the skin factor S_F can be evaluated.

It should be noted that the derived method for skin factor determination is not intended as a substitute for other procedures but as a complementary solution providing application possibilities even when some methods cannot be used.

Funding

This research was funded by Technology Agency of the Czech Republic, grant number TH02030421 “ULTRA—technology for pumping well rehabilitation based on ultrasound emission”.

Kapitola III

Software for Evaluating Pumping Tests on Real Wells

V.Ficaj, P. Pech, **D. Kahuda** (podíl disertanta 30%)

Adapted from *Applied Sciences*. 2021; 11(7):3182.

<https://doi.org/10.3390/app11073182>

Content

Abstract	64
Introduction	65
Materials and methods	67
Additional resistances (Skin Effect)	67
Well Storage (WBS)	69
Data	73
Results	75
Software	75
Discussion	85
Conclusions	87

Abstract

As the climate is changing, greater exploitation of groundwater reserves is becoming evident; however, this would have been apparent even without climate change. Therefore, increasing emphasis is given to maintaining well functionality. Wells are susceptible to aging, which reduces their efficiency. Today, there exist several solutions for determining the size of additional resistance (the skin effect), which indicates a well's current state and that of its close surroundings. The implementation of most of these solutions is often time-consuming. To improve our tools, a goal has been set to accelerate and facilitate the method of determining the size of additional resistance. In this study, we present new software that accelerates this process. It applies an innovative method based upon a partial differential equation describing the radially symmetric flow to a real well, which occurs under an unsteady regime, using the Laplace transform. Stehfest algorithm 368 is used to invert the Laplace transform. Such software can be used to evaluate an additional-resistance well, even when a straight section evaluated using the Cooper–Jacob method is not achieved in the semilogarithmic plot of drawdown vs. log time during the pumping test. This solution is demonstrated in the comprehensive evaluation of 10 wells and 3 synthetic pumping tests.

Keywords: **well**; **pumping test**; **additional resistances**; **skin factor**; **well aging**; **well regeneration**; **software**

Introduction

Pumping tests are conducted for the purpose of determining not only aquifer parameters (hydraulic conductivity, transmissivity and storativity), but also well parameters (e.g., the coefficient of additional resistance, known as the skin factor, and well storage). In 1935, Theis (Theis, 1935), on the basis of idealized conditions, published a solution to a basic equation describing an unsteady, radially symmetric flow to an ideal well in a saturated aquifer. Theis used an analog equation describing thermal conduction in a solid environment to describe groundwater flow through a permeable environment (Carslaw, 1921). His solution is used to determine an aquifer's transmissivity and storativity in the case of a well without additional resistances and with a negligibly small radius, and is known as the Theis type-curve method. Cooper and Jacob (Cooper & Jacob, 1946) built on this work by simplifying the Theis well function, generating a straight section for longer pumping test times when plotting drawdown vs. the logarithm of time and incorporating only the first two elements of the Theis well function, while omitting the others (the error in the calculations for the argument of the Theis function is less than 0.01–0.25%). Pumping tests on actual wells are influenced first by additional resistances (expressed by the skin effect). Van Everdingen (Van Everdingen, 1953) and Hurst (Hurst, 1953) were the first to incorporate additional resistances in a well and its close surroundings in calculations for oil wells. Hawkins (Hawkins Jr., 1956) inserted additional resistances into calculations in the form of a zone around a well with altered hydraulic conductivity (K). In the initial phase of a pumping (and drawdown) test, the well volume (well storage (WBS)) has a significant effect on drawdown over time. Papadopulos and Cooper (Papadopulos & Cooper, 1967) were the first to take this into account in underground hydraulics, while Ramey (Ramey & Agarwal, 1972) and others (Bourdet, 2002), (Batu, 1998) first incorporated this factor in the oil sector. Kucuk and Brigham (Kucuk & Brigham, 1979) addressed the issue of the impact of a well's volume on pumping tests in elliptical coordinates. Mathias and Butler (Mathias & Butler, 2007) expanded upon Kucuk and Brigham's solution by factoring in well storage and horizontal anisotropy. Yang et al. (Yang & Yeh, 2005) and others (Chen & Chang, 2006), (Yeh, Yang, & Peng, 2003) investigated this method in the Laplace domain. In 1970, Agarwal et al. (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970) published a basic solution to the equation for unsteady, radially symmetric flow of a liquid to a complete well, taking into account additional resistances and the effect of well volume. Subsequent authors derived various approaches and methods, such as type curves, for determining additional resistances and well storage using a pumping test (Wattenbarger & Ramey, 1970), (Kasenow, 2010), (Gringarten, Bourdet, Landel, & Kniazeff, 1979), (Earlougher R. C., 1977), (Earlougher & Kersch,

Analysis of short-time transient test data by type-curve matching, 1974), (Novakowski, 1989), (Chu, García-Rivera, & Raghavan, 1980). Van Everdingen (Van Everdingen & Hurst, 1949) was among the first to use the Laplace transform to solve the basic partial differential equation for radially symmetric inflow into a well under an unsteady regime. Several authors from oil and groundwater hydraulics sectors (Novakowski, 1989), (Chu, García-Rivera, & Raghavan, 1980), (Watlton, 2007) have commonly applied solutions using the Laplace transform. Even to this day, Stehfest algorithm 368 (Stehfest, 1970) is often taken as the most suitable approach for inverting the Laplace transform in both groundwater hydraulics and the oil sector (Al-Ajmi, Ahmadi, Ozkan, & Kazemi, 2008), (Yang & Yeh, 2009). For example, several authors (Watlton, 2007), (Hall & Chen, 1996), (Pasandi, Samani, & Barry, 2008) have applied the Stehfest algorithm to real wells (i.e., wells for which additional resistances and the effect of well volume are taken into account). Software applications are also currently used for real wells. This article elaborates a software solution for a real well, and the created software is used to evaluate the skin factor of 11 wells. The results are compared using the classic Cooper–Jacob method (Cooper & Jacob, 1946), which introduces a skin factor (application of the Cooper–Jacob method was possible because the pumping tests were sufficiently long for a so-called second straight section to be achieved in the semilogarithmic plot; Figure 1). An advantage of the presented software solution is the possibility of also using it in cases when no Cooper–Jacob straight section is achieved during the pumping test (i.e., for the early portion of pumping tests).

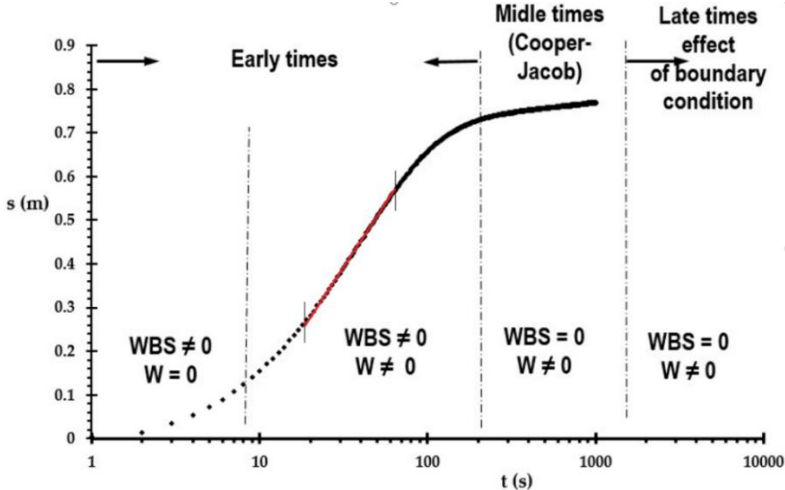


Figure 1. Semilogarithmic plot of drawdown s vs. $\log t$ in a pumped well.

Materials and Methods

At present, pumping tests are most often used to determine aquifer parameters. To evaluate hydraulic parameters, it is essential to know the timing of water-level drawdown in the examined well and at least one observation well. In 1935, Theis (Theis, 1935) published a solution to the basic equation for radially symmetric flow to a well in a confined aquifer. The method of evaluating an aquifer's hydraulic parameters for an ideal well is known as the Theis type-curve method.

This method is seldom used in practice, because it is intended for an ideal well. Another method used to determine an aquifer's hydraulic parameters from pumping and build-up tests is the Cooper–Jacob semilogarithmic approximation (Cooper & Jacob, 1946). This method is based on Theis' solution. For $1/u$ values of >100 with an error less than 0.25%, the Theis well function can be simplified by leaving out its third and subsequent elements. This method is used for the straight-line section (red line), as seen in Figure 1, where the WBS represents well storativity and W represents the skin effect. The final equation for drawdown in an ideal well is (Cooper & Jacob, 1946)

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} \ln \left(\frac{2.246Tt}{r_w^2 S} \right) \quad (III - 1)$$

where s_w is drawdown at a well (m), Q is the pumped amount of water ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), T is aquifer transmissivity ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), t is time (s), and S is aquifer storativity (-).

Additional Resistances (Skin Effect)

Additional resistances cause most wells to lose their specific capacities over time. This results primarily from well aging due to mechanical, chemical, and biological processes. Mechanical degradation is most often caused by sedimentation of small particles in the well's close surroundings. Mechanical degradation may also occur when creating the well itself. All methods of well boring result in compacting and redistributing material. Chemical degradation is most observed in areas where flowing water has higher amounts of dissolved mineral substances. This type of degradation is caused by deposition of mineral substances in individual sections of the well. The most common substances are calcium carbonate, magnesium carbonate, calcium sulfate, manganese, and iron. Biological degradation is caused by bacteria that occur naturally in most aquifer strata. These bacteria can be divided into three basic groups. The first and most widespread group consists of iron-oxidizing bacteria. These bacteria oxidize iron compounds and produce iron (III) hydroxide, an organic compound with a reddish color. This substance has a slimy character and forms deposits on well walls and pump

parts and in the well's close surroundings. If the substance is exposed to wind, it hardens and can then cause even greater damage. The second group consists of sulfur-reducing bacteria. These bacteria can be found even in extremely acidic waters, with pH levels as low as 1. These bacteria produce sulfuric acid and hydrogen sulfide. The presence of these bacteria may be indicated by a foul odor. The final group consists of slime-producing bacteria, which coexist with the aforementioned types of bacteria. The slime produced most often affects parts of the pump, but may also block the well screen or pores in the aquifer stratum around the well. All forms of well degradation described above alter the hydraulic conductivity of individual well parts and the adjacent aquifer stratum. The aggregate of all these factors is called the skin effect, a term first defined by van Everdingen. The term skin effect stems from the fact that these additional resistances can, in practical applications, be replaced by an infinitesimally thin zone (see **Figure 2**) that influences hydraulic conductivity. There are two types of skin effects: positive and negative. A negative skin effect is caused by the elevated permeability of the aquifer stratum in the well's surroundings. Elevated permeability occurs most often in environments featuring rifts. If individual rifts reach the well, a negative skin effect may occur. In practice, however, positive skin effects are more common. Such skin effects reduce the hydraulic conductivity in the near-well region (Payne, Quinnan, & Potter, 2008), (Hiscock & Bense, 2014), (Chen & Lan, 2009), (Kruseman & de Ridder, 2008), (Wen, Huang, & Zhan, 2006), (Barua & Bora, 2010), (Kahuda & Pech, 2020), (Dastkhan, Zolalemin, Razminia, & Parvizi, 2015), (Sousa, Barreto, & Peres, 2016), (Fan & Rarashar, 2020), (Holub, Pech, Kuraz, Maca, & Kahuda, 2019).

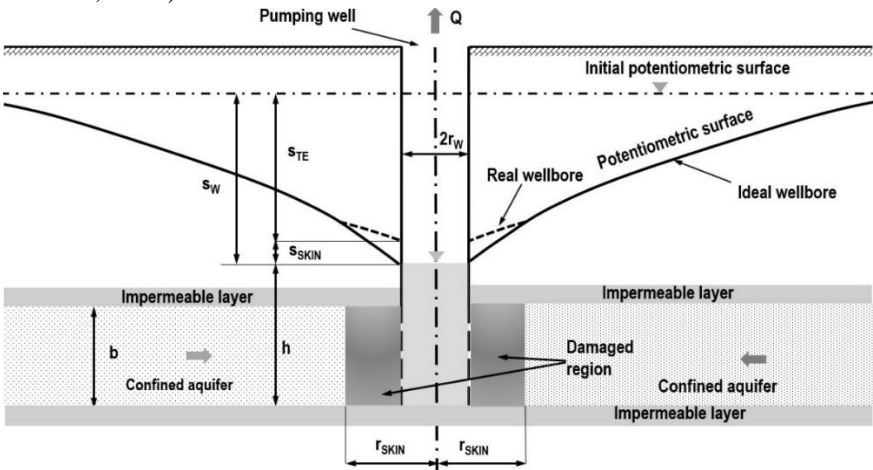


Figure 2. Diagram of a real well: an aquifer stratum with saturated water level.

Software for Evaluating Pumping Tests on Real Wells

Based on (Bourdet, 2002), it is possible to calculate the coefficient of additional resistances, W (skin factor), in the case of a real well, as in Equation (III - 2).

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{2.246Tt}{r_w^2 S} + 2W \right) \quad (\text{III} - 2)$$

where W is the skin factor (-).

From Equation (III - 2), the coefficient of additional resistances (skin factor) is

$$W = \frac{2\pi T s_w}{Q} - \frac{1}{2} \ln \frac{2.246Tt}{r_w^2 S} \quad (\text{III} - 3)$$

and the drawdown caused by additional resistances (steady flow) is (van Everdingen, 1953)

$$s_{SKIN} = \frac{Q}{2\pi T} W \quad (\text{III} - 4)$$

where s_{SKIN} is the additional drawdown (caused by the skin effect) (m).

Well Storage (WBS)

Well storage significantly impacts the initial phase of the pumping test (see Figure 1) in the order of seconds from commencing the test. The reason is that, at the start of the pumping test, water is pumped from the well itself. As the pumping test proceeds, inflow from the surrounding aquifer increases until it equals the pumped amount. The amount of water pumped from the well volume, on the other hand, decreases with time until it becomes negligible. The degree of this impact depends on the well radius. Ramey and Agarwal (Ramey & Agarwal, 1972) addressed this issue and defined a per-unit well storage factor, as presented in Equation (III - 5)

$$C = Q \frac{t_j}{s_j}, \quad (\text{III} - 5)$$

where C is the per-unit well storage factor (m^2) and t_j and s_j are time and drawdown, respectively, from the unit slope log-log graph, where WBC dominates (Figure 1) (Ramey & Agarwal, 1972).

This article uses the following dimensionless parameters (see (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970), (Liu, Li, Xia, Jiao, & Bie, 2016) , (Sethi, 2011))

- Dimensionless time

$$t_D = \frac{Tt}{r_w^2 S} \quad (\text{III} - 6)$$

- Dimensionless radius

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (\text{III} - 7)$$

- Dimensionless drawdown

$$s_D(r_D, t_D) = \frac{2\pi T}{Q} (H - h(r, t)) \quad (\text{III} - 8)$$

- Dimensionless drawdown at a well

$$s_{WD}(r_D = 1, t_D) = \frac{2\pi T}{Q} (H - h_w(r_w, t)) \quad (\text{III} - 9)$$

- Dimensionless well storage

$$C_D = \frac{C}{2\pi S r_w^2} \quad (\text{III} - 10)$$

where r is the distance from the pumped well (m), H is the initial hydraulic head (m), $h(r, t)$ is the hydraulic head at distance r and time t (m), and h_w is the hydraulic head in the well (m).

The method of determining the size of additional resistances used in this study was published by Agarwal et al. (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970) in relation to the oil sector. This solution is derived from a drop in pressure across the impacted area surrounding the well, given an unsteady flow. Several assumptions have been made for modeling (Kruseman & de Ridder, 2008), (Barua & Bora, 2010):

- The aquifer is confined and has a seemingly infinite areal extent.
- The aquifer is homogeneous and isotropic and of uniform thickness over the area.

Software for Evaluating Pumping Tests on Real Wells

- The flow is horizontal.
- Prior to pumping, the piezometric surface is horizontal over the area.
- The pumping rate is constant throughout the pumping test.
- The well penetrates the entire thickness of the aquifer.
- The well has a finite volume, and the well storage coefficient is constant throughout the pumping test.
- Additional resistances in the well and its surroundings are non-zero.

For groundwater flow, in terms of dimensionless parameters, the well-known diffusivity equation in the radial coordinates has the form (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970), (Kruseman & de Ridder, 2008) , (Liu, Li, Xia, Jiao, & Bie, 2016) , (Mashayekhizadeh & Ghazanfari, 2011)

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

Initial and boundary conditions:

At time $t = 0$ and when applying the dimensionless parameters of Equations (III - 6) to (III - 8),

$$s_D(r_D, t_D = 0) = 0 . \quad (\text{III} - 12)$$

In the case of dimensionless well drawdown

$$s_{wD}(r_D = 1, t_D = 0) = 0 . \quad (\text{III} - 13)$$

For $r_D \rightarrow \infty$, dimensionless drawdown is as follows

$$s_D(r_D, t_D) = 0 \quad (\text{III} - 14)$$

The marginal condition for additional resistances in the well and its surroundings is as follows (Chen & Chang, 2006)

$$s_{wD} = s_D + \left(r_D \frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} W \quad (\text{III} - 15)$$

he outer condition for a pumped well when factoring in the impact of the well volume on the pumping test in relation to Equation (III - 15) is (see (Van Everdingen & Hurst, 1949))

$$C_D \frac{\partial s_D}{\partial t_D} - \left(r_D \frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = 1. \quad (\text{III} - 16)$$

Equation (II - 11) is solved using a one-dimensional Laplace transform. The following type of transform function is used to convert the partial differential equation in dimensionless parameters into an ordinary differential equation (Watlton, 2007)

$$F(p) = L(f(t)) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt \quad (\text{III} - 17)$$

The transformed solution in the Laplace domain for dimensionless drawdown is

$$\overline{s_D} = \frac{K_0(r_D p^{0.5})}{p\{p^{0.5}K_1(p^{0.5}) + C_D p[K_0(p^{0.5}) + Wp^{0.5}K_1(p^{0.5})]\}}. \quad (\text{III} - 18)$$

The transformed solution in the Laplace domain for dimensionless drawdown at a well (from Equations (III - 16) and (III - 18)) is

$$\overline{s_{wD}} = \frac{K_0(p^{0.5}) - Wp^{0.5}K_1(p^{0.5})}{p [p^{0.5}K_1(p^{0.5}) + C_D p^{0.5}(K_0(p^{0.5}) + Wp^{0.5}K_1(p^{0.5}))]}, \quad (\text{III} - 19)$$

where p is the Laplace operator; K_0 and K_1 are the zero- and unit-order modified Bessel functions, respectively; $\overline{s_{wD}}$ is the dimensionless well drawdown in the Laplace domain; and s_{wD} is obtained by Stehfest numerical inversion (Watlton, 2007):

$$s_{wD}(t_D) = \frac{\ln(2)}{t} \sum_{i=1}^N V_i \overline{s_{wD}}(p) \quad (\text{III} - 20)$$

$$p = i \frac{\ln(2)}{t} \quad (\text{III} - 21)$$

$$V_i = (-1)^{\frac{n}{2}+i} \sum_{k=\lceil \frac{i+1}{2} \rceil}^{\min(i, \frac{n}{2})} \frac{k^{\frac{n}{2}}(2k!)}{\left[\left(\frac{n}{2} - k \right)! k! (k-1)! (i-k)! (2k-i)! \right]} \quad (\text{III} - 22)$$

Data

The data used for the analysis come from Serbia. The parameters of the aquifer and the well can be seen in **Table 1** and **Table 2**. The parameters obtained from the pumping test already include the anisotropy and inhomogeneity of the aquifer. In addition, most of the aquifers can be considered uniform with constant thickness.

Table 1. Parameters of the aquifer.

Name	Transmissivity T (m ² s ⁻¹)	Storativity S (-)
B1	0.00585	0.013
B3	0.00385	0.0123
B6	0.0036	0.00864

Table 2. Parameters of the well.

Name	r _w (m)	Well depth (m)	Well storativity (-)
B1	0.149	87	996.6
B3	0.1615	120	689.7
B6	0.1615	110	2405.3

These data are limited by several uncertainties, which may occur because of several reasons: (1) structural–technical, (2) methodological, and (3) hydrogeological.

1. In the first group especially, besides the construction design and use of material for collection wells, the type of connection and handling of pumping technology, including the drainage of water through the pipelines, one limiting factor is the initial phase of pumping, at which point the measurement can be affected by the dispersion of the moving elements of the submersible pumps. (This happens particularly in the case of high-capacity water supply wells in systems that are usually regulated by safety features, especially by frequency alternators.) As a result, there is a delay in reaching the originally set up pumping output. Another potential effect can be caused by the

pressure resistance of the adjoining pipeline distribution system, including hydraulic shocks and the volume of the water in the discharge pipe (especially where non-return valves are absent).

2. Methodological causes are related to the choice of the duration of the hydrodynamic tests conducted, as well as to adjustments and interpretation of measurement data, which, in the case of horizontal inhomogeneity, tends to provide, with increasing time, increasing variation in the evaluation of hydraulic parameters.

3. Hydrogeological causes of limitations and uncertainties of hydraulic parameters are mainly related to the vertical inhomogeneity of the rock environment when, in permeable rocks, the water flow follows the principle of dual porosity, which means it has a strong tendency to flow through preferential channels. Aquifers are usually divided into several individual tributaries, and they can also have different levels of underground water; moreover, the vertical direction of the water flow may also change. Then, if, during the pumping test, the groundwater level falls below that of one of the tributaries and the level of the latter also rises above the level of the saturated water flow, significant changes in the dynamics of measured levels occur, which also contribute to uncertainties in the interpretation of the resulting data.

As far as the overall effects of the abovementioned limitations and uncertainties are concerned, the significance of errors of the sought-after parameters proportionally reflects the significance and size of the total input parameters.

Results

Software

Part of the process of developing the software was to analyze the limits of the computational method used. The analysis consists of two parts. The first part examines the accuracy of the sought parameters, depending on the pumping test duration, being 10%, 20%, 30%, and up to 100% of the total duration. The obtained parameters are then compared with the value that most corresponds to reality. This cross-sectional value for individual runs of pumping tests was obtained by applying the computing method at the core of the software. All pumping tests were examined by the same computing method. Different values of the non-dimensional additional resistance and non-dimensional storativity of the drilling well were applied until a near 100% match in the runs of the simulated and real pumping tests occurred. This article presents the analysis of a single well before and after regeneration. This analysis represents the trend observed for all pumping tests analyzed. **Figure 3** and **Figure 4** depict the percentage variance of well storage and additional resistances relative to optimal values. As is evident from **Figure 3** and **Figure 4**, the variance in the case of the skin effect when using only 1% of the total pumping test data is around 30% from the optimal value. When using 3% of the data, the variance is less than 5%. When using more than 5% of the data, highly accurate results are achieved that may be taken as authoritative. With increasing use of section data, the variance shows a slightly declining trend. With regard to the sought parameter of well storage (see **Figure 3** and **Figure 4**), using 0.5% of the data in both cases corresponds to a very small variance, not exceeding 2%. The variance shows a clear increasing trend for data use of up to 6% and a declining trend thereafter. This is because well storage affects only the initial phase of the pumping test, in the order of minutes at most, but more likely seconds. This analysis indicates that it is expedient to use data covering 10% of the test for two reasons: (1) the time-consuming nature of the calculation process, which should be minimized to the greatest extent possible, and (2) the high accuracy of the resulting parameters already achieved at this stage.

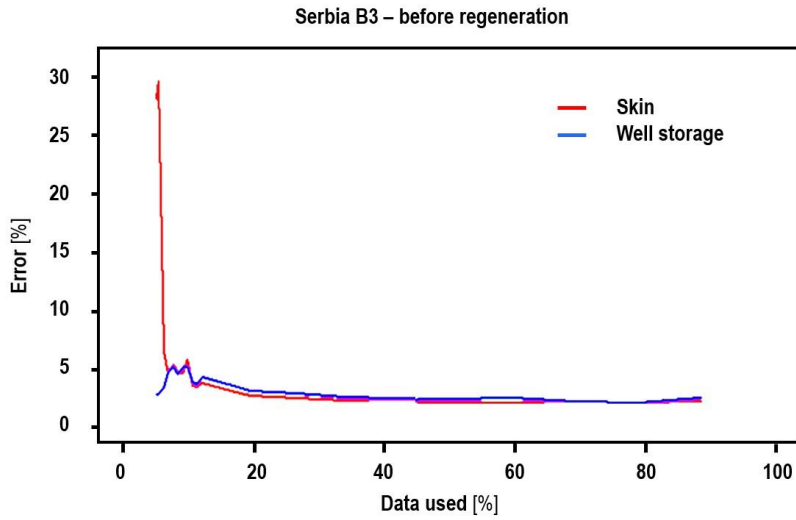


Figure 3. Plot depicting the percentage error for the skin effect and well storage parameters for the well Serbia B3 before regeneration dependent upon the percentage of data used from the pumping test.

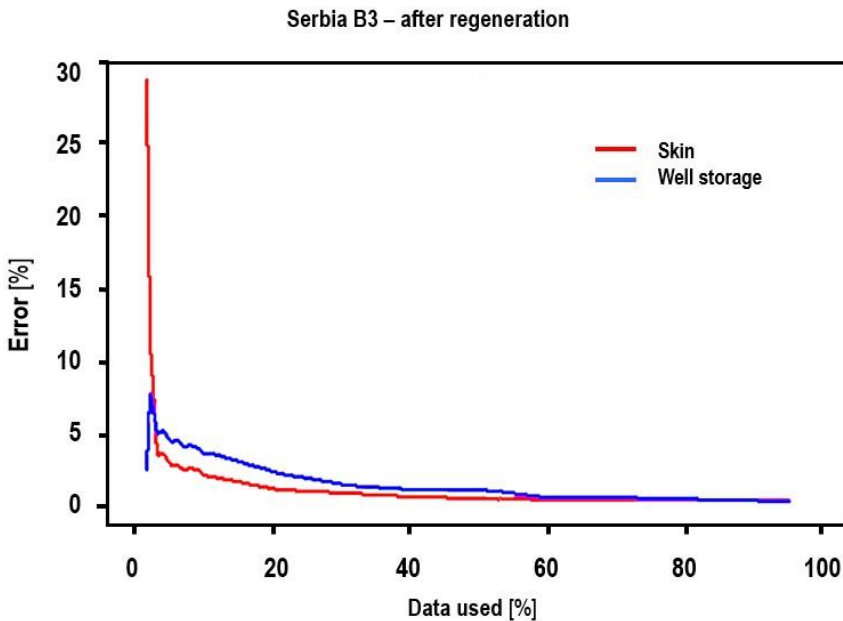


Figure 4. Plot depicting the percentage error for the skin effect and well storage parameters for the well Serbia B3 after regeneration dependent upon the percentage of data used from the pumping test.

The second part of the analysis examines the accuracy when using a combination of individual sections of the pumping test. This approach may be suitable when a measurement error or brief outage of the pump occurs during the pumping test or when a portion of data is missing. **Figure 5** shows the division of the pumping test into individual sections.

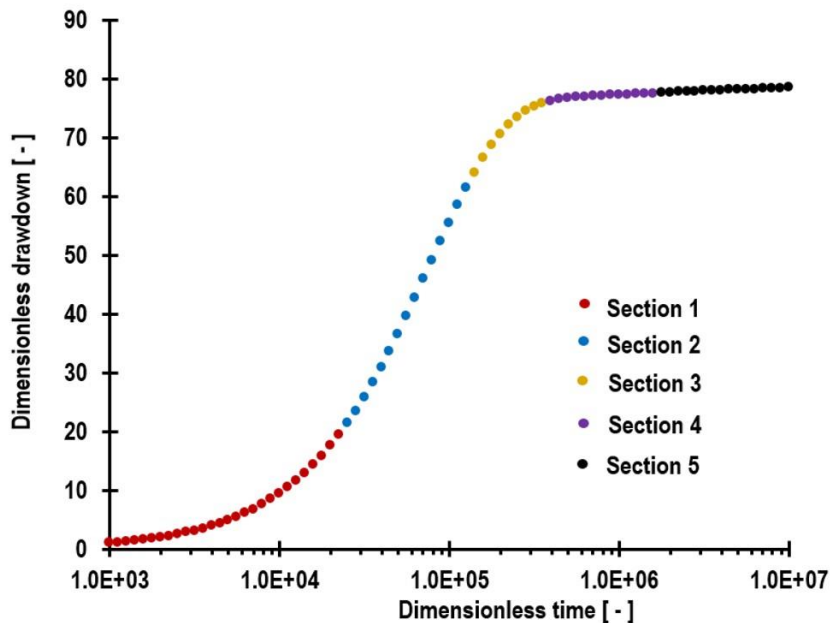


Figure 5. Plot showing division of the pumping test into individual sections

All analyzed pumping tests were divided in a similar manner into sections, whose shapes were influenced by specific parameters (see **Figure 1**). A pumping test is divided into the initial section, the first straight section, the section between the first and second straight sections, the second straight section, and the final section. As stated above, the sought parameters of additional resistances and well storage are obtained using an optimization method of differential evolution, where it is necessary for the user to enter a range of values that he or she finds most likely to be optimal. This analysis was conducted both for the optimal limit (i.e., the limit at which the optimal values were found) and for the double limit. For example, if the optimal limit is in the range of 0 to 100, then the double limit is in the range of 0 to 200. In the case of this optimization method, the range entered by the user is crucial for achieving accurate results. **Figure 6** shows the additional parameter resistances evaluated. Again, in this case, the poorest estimate was given by the combination of the first and second sections.

The combination of the first and fourth sections shows an overestimate, albeit only for the double limit. Once again, this trend was observed also in other analyzed wells, and the error for all combinations did not exceed 2%. The main information obtained from this analysis is that all combinations of sections for both optimal and double limits give highly accurate values for the sought parameters. This is important in terms of practical use, when a situation may occur in which it is necessary to omit some sections of the pumping test. **Figure 7** shows the evaluated parameter well storage for individual combinations of sections. The red horizontal dotted line indicates the optimal value. As the figure shows, the poorest estimate for the optimal and double limits was given by the combination of the first and second sections, followed by the combination of the third and fourth sections. Of course, the maximum error is up to 3%.

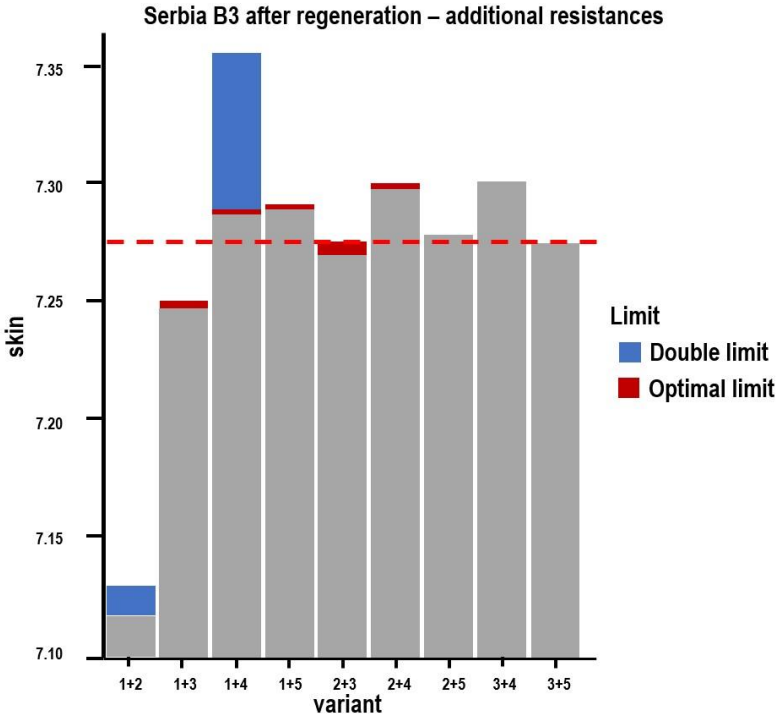


Figure 6. Resulting values of the parameter additional resistances.

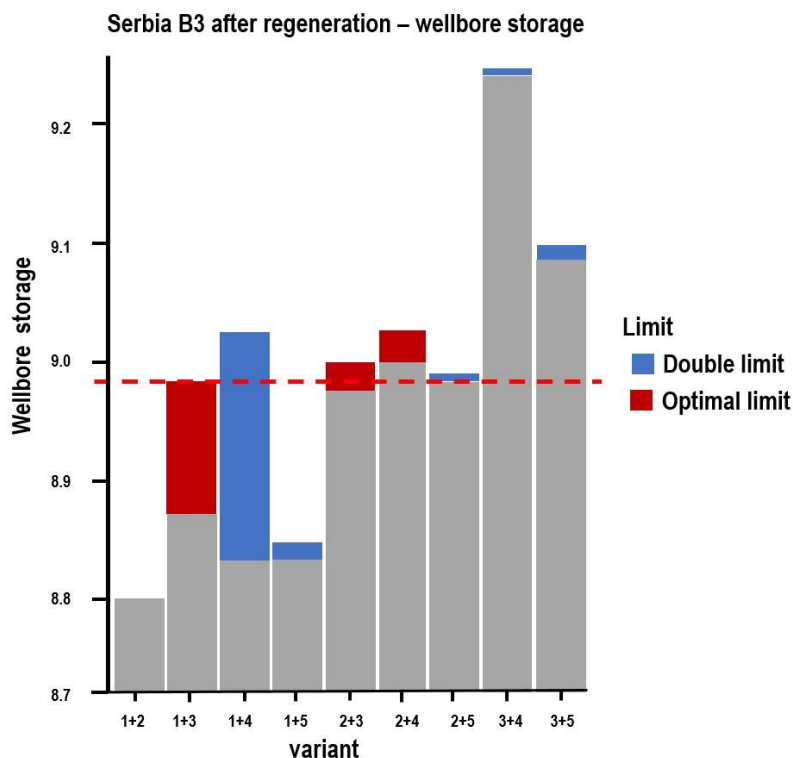


Figure 7. Resulting values of the parameter well storage, depending on the combination of sections used.

Now, we present a description of the software. A block diagram of the software is shown in **Figure 8**. This software primarily determines the parameters' additional resistances and well storage. It also evaluates an aquifer's hydraulic conductivity, the range of the cone of depression, and transmissivity. The user may also use the program to plot the results on a graph or to store them in a special format for use in another environment, such as the R programming language. However, all settings, including for data may also be opened directly in the software. The software also enables automatic generation of a final report, which may be partly modified according to the user's needs.

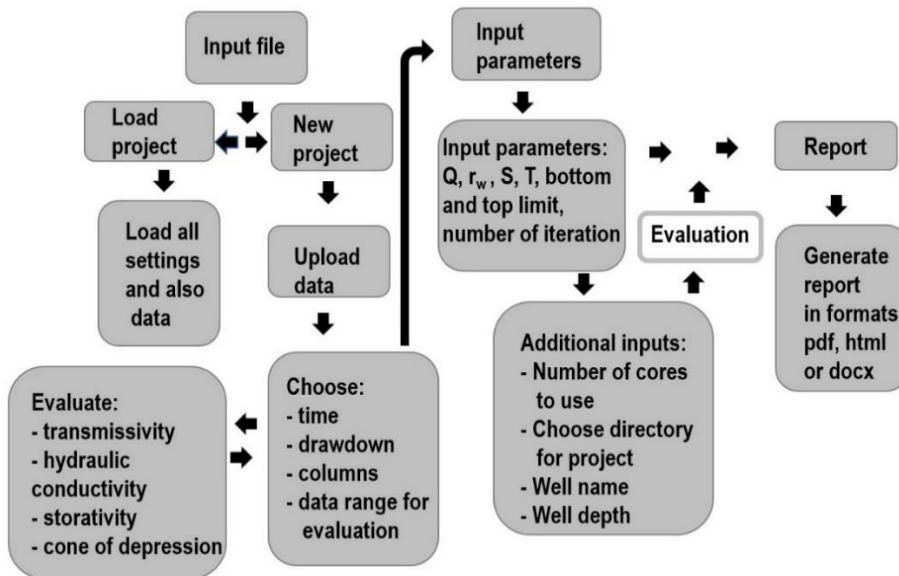


Figure 8. Software diagram.

Next, we describe the user interface. The software is divided into three main tabs: Input file, Input parameters, and Report. Each of these tabs comprises two to three levels. Below, we describe how to use the software. Start-up (see **Figure 9**) loads the introductory menu, where the user may select whether to start a new project or make changes to or continue a project already created. If the user chooses to work on a new project, he or she is prompted to upload a file containing the pumping test data. Files may be in txt or xlsx format. If a different file format is selected, the software shows a warning and takes no action. If an xlsx file is uploaded, the user must then select the respective sheet within which the data can be found. After uploading a file and, if necessary, selecting the appropriate worksheet, the program proceeds to the next tab: Input file.

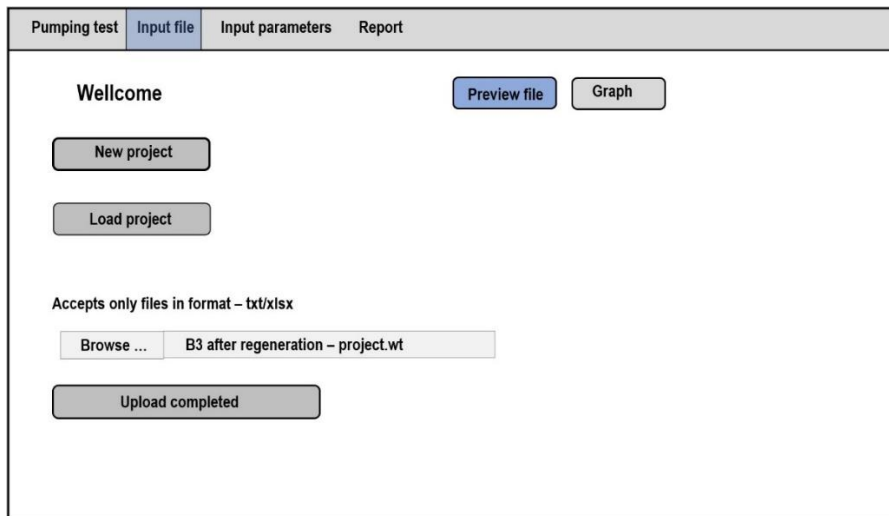


Figure 9. Start-up menu: illustrative image

Now, the user selects how many rows to display from the uploaded file. The default setting is to display only 20 rows, mainly for reasons of computational demand. This tab also offers options for the choice of separators to divide individual columns. There are three options: Comma, Semicolon, and Table The final choice is the decimal separator: Comma or Period. The Preview file button to the right allows the user to inspect the data (see **Figure 10**). The user then proceeds to the next step by clicking Next. At this stage, the user must select the respective columns representing time and drawdown in the well. Here, the user may also choose any section of the data to be used in the calculations. The section can be selected by entering its beginning and end. Clicking the Graph button on the right displays a plot of the selected data (see **Figure 11**). The plot shows the section of data selected for calculation in red and the rest of the pumping test data in black.

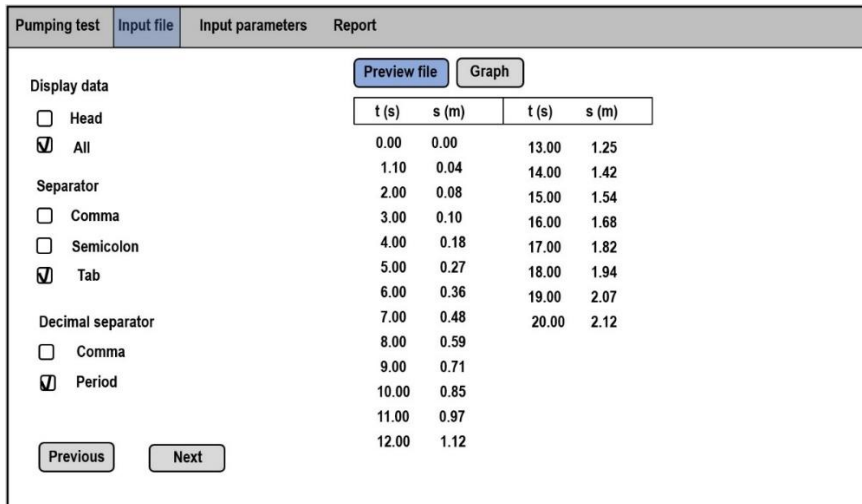


Figure 10. Data display and choice of separator: illustrative image

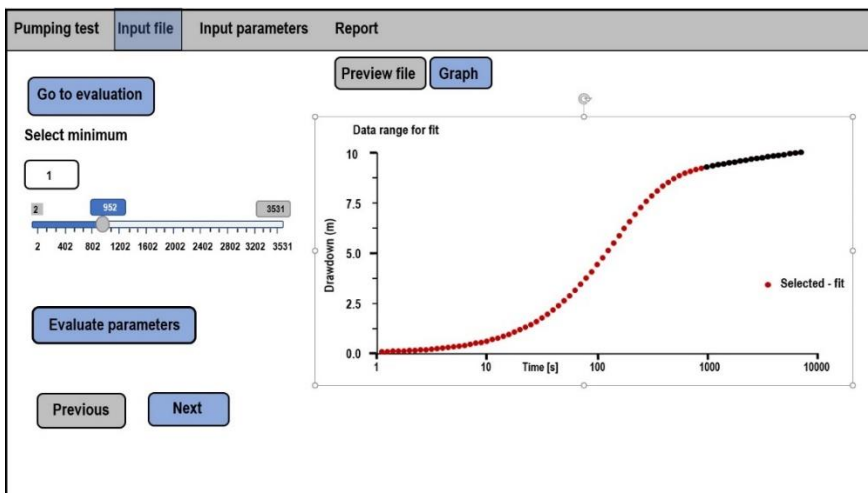


Figure 11. Checking the pumping test and choice of the data section for calculation: illustrative image.

As mentioned above, the software may also be used to evaluate an aquifer's transmissivity, hydraulic conductivity, and the range of the cone of depression. If the user wishes to evaluate one of these parameters, he or she must click the Evaluate parameters button, after which a menu of parameters appears. In the case of evaluating transmissivity, a plot is displayed, for which it is necessary to select the data found in

the second straight section. Data selection is done as in the case of selecting data for calculations (see **Figure 12**).

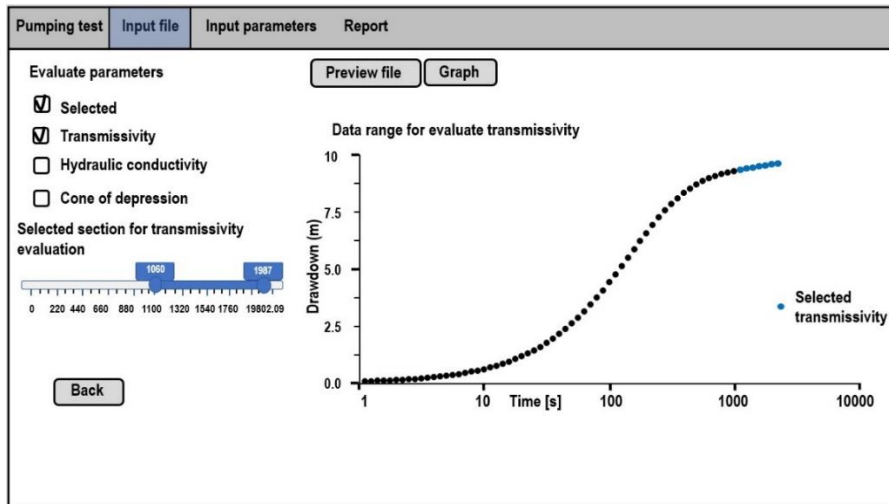


Figure 12. Data range for transmissivity evaluation: illustrative image.

In the case of evaluating the range of the cone of depression or hydraulic conductivity, the user must enter the aquifer thickness. The user may then proceed to the second tab: Input parameters. The first step in this tab is to enter the required parameters: the pumped amount, the well radius, storativity, and transmissivity. If these parameters are available in a file, the user may upload the file and display the data using the Preview file button, as in the case of uploading a file with pumping test data. The next step in this tab is to set the lower and upper limits between which the software will search for the optimal storativity and dimensionless additional resistance values. Before running the calculation, the user may also select the number of processor cores to use and whether to save the project. After completing the calculation, the user may inspect the resulting simulation by clicking the Graph button (see **Figure 13**).

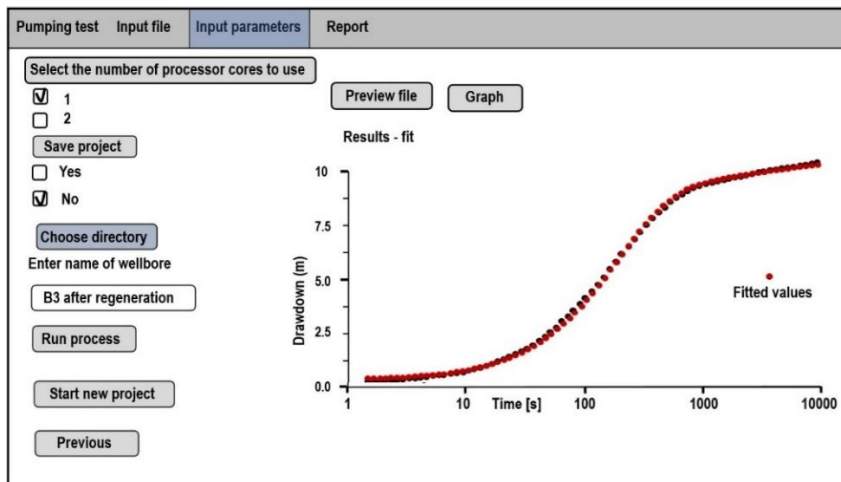


Figure 13. Plot of a real (black) vs. simulated (red) pumping test: illustrative image.

If the simulated pumping test mirrors the real test, this indicates that the calculated parameters are optimal. In the case of a bad fit, the user may select different lower and upper limits and repeat the calculation. As previously mentioned, the software also allows storage of the final report in pdf, html, or docx format. Clicking the Report tab loads a menu where the user can select the type of graph to be included in the final report (see **Figure 14**). Here, the user may also enter the well's location and depth. The final step is to select the format for the final report.

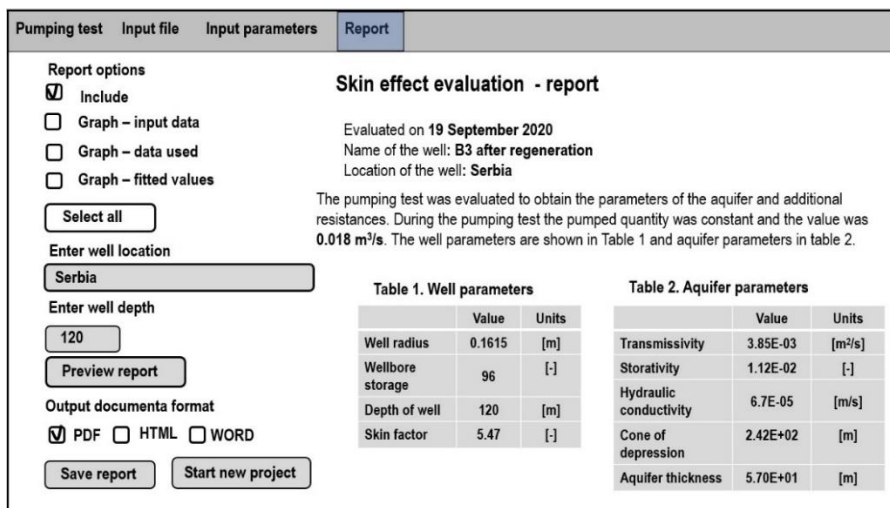


Figure 14. Output report: illustrative image.

Discussion

The created software was used to evaluate several real pumping tests, and the resulting additional resistance values were compared with those from another calculation method. The resulting skin effect values were compared with the solution presented by Equation (III-3).

As is evident from **Table 3** and **Table 4**, in most cases, the resulting values were nearly identical, differing in the vast majority of cases by only tenths. In the case of Obrtka O9B, the evaluated skin factor was higher (+2), representing a 27% divergence. The calculation stemming from Agarwal's solution requires a pair of initial parameters representing time and corresponding drawdown in the second straight section. For this reason, there exists a set of combinations that may be used in the calculation, thereby generating divergent results. For this calculation, it is, of course, necessary to have available pumping data up to the time when the inflow into the well approaches a steady flow. The software, on the other hand, can evaluate the skin effect with high accuracy, even when using a considerably shorter section of pumping test data. Highly accurate results may be achieved using around 5% of the total pumping test data. Well storage, as mentioned, impacts the initial phase of the pumping test on the order of seconds and, in a few cases, tens of seconds (depending on the well radius). Thanks to the calculation method used, it is possible to determine well storage even when using an early time section of the pumping test data that was not impacted by well storage. As found in the analysis of the limits of the calculation method used, accurate results for additional resistances and well storage are obtained when using any combination of pumping test sections. Therefore, this method is suitable for use with pumping tests in cases when, for example, there has been a pump outage or there are missing data in some sections of the test.

Table 3. Resulting additional resistance values.

Locality and Well Name	Q (m^3s^{-1})	r_w (m)	T ($m^{-2}s^{-1}$)	S (-)	CD (-)	W Software	W Cooper-Jacob Equation (III-3)	Percentage Divergence (%)
Serbia B-1	0.0102	0.1500	0.0058	0.0130	990	5.41	5.25	3
Serbia B-3	0.0180	0.1615	0.0026	0.0441	50.0	5.45	5.29	3
Serbia B-6	0.0118	0.0118	0.0036	0.0863	148	3.03	3.56	15
Serbia EB-1	0.0122	0.1615	0.003	0.0023	2360	4.84	4.74	2
Drnovec CV-2	0.0588	0.1625	0.00241	0.0011	900	1.01	0.95	6
Radouň RD-1	0.019	0.15	0.0098	0.00066	160	1.6	1.45	9.4
Radouň RD-2	0.142	0.15	0.00106	0.00018	180	2.66	2.68	1
Kolín KV-2	0.0022	0.17	0.0245	0.076	16	5.72	5.17	10
Kolín KV-9	0.00416	0.17	0.023	0.076	10	4.98	5.01	1
Obrtka O9A	0.0026	0.186	0.0234	0.00038	5500	7.2	7.31	1.5
Obrtka O9B	0.0097	0.125	0.00186	0.0419	160	7.21	5.23	27

Table 4. Synthetic tests.

Synthetic Test	Q (m^3s^{-1})	r_w (m)	T ($m^{-2}s^{-1}$)	S (-)	CD (-)	W (-)	W Software	W Cooper-Jacob Equation (III-3)	Percentage Divergence (%)
Test 1	0.005	0.20	0.0120	0.010	100	10	9.998	9.97	0.24
Test 2	0.003	0.25	0.0015	0.002	100,000	20	20.0003	19.99	0.0017
Test 3	0.012	0.40	0.0030	0.0025	100,000	50	50.007	49.99	0.0141

Conclusions

The result of this work is a functional piece of software that considerably reduces the time demand when determining the magnitude of additional resistances and well storage. One of the advantages of this software is that it is available for free upon request to the authors (ficaj@fzp.czu.cz). It can also be downloaded from the following website: <https://github.com/Ficaj/Wtest> (accessed on 23 March 2021). Compared to most other similar software programs (AQtesolv, AquiferTest, MLU), which might take many years to develop, this one can be handled easily and almost intuitively. As a result, there is no need for time-consuming training. Most other software programs also lack the unique computing method used here. As mentioned above, the key benefit of this method is that it is based on the initial straight-line tract. Thanks to this method, dozens of minutes can be saved in real-life tests. Moreover, other benefits could be added, such as reducing the time needed for evaluation so that it is not much longer than one minute, as well as the preparation of a (predefined) report. This software is capable, among other things, of evaluating the following parameters: an aquifer's transmissivity, storativity, the range of the cone of depression, and hydraulic conductivity.

This research was funded by the Technology Agency of the Czech Republic (grant number TH02030421) under the project titled ULTRA—Technology for Pumping Well Rehabilitation Based on Ultrasound Emission.

Kapitola IV

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

D. Kahuda, P. Pech, V. Ficaj, H. Pechová (podíl disertanta 50%)

Adapted from *Coatings*. 2021; 11(10):1250.
<https://doi.org/10.3390/coatings11101250>

Content

Abstract	90
Introduction	91
Materials and methods	94
Ultrasound	94
Additional Resistances	96
Results	102
Development of Ultrasonic Well Recovery Equipment	102
Machine Platform	103
Field Deployment of the Ultrasonic Equipment during the MO-4	108
Well Rehabilitation and Evaluation of the Effects of the Rehabilitation Intervention	
Well Rehabilitation	109
Well Logging	112
The Inspection of Well Gravel Filter	112
Discussion	119
Conclusions	121

Abstract

The exploitation of groundwater reserves, especially for drinking purposes, is becoming increasingly important. This fact has created the need to maintain wells in the best possible functional condition. However, wells are subject to an ageing process during intensive use, which entails an increase in up-to-date resistances in the well itself and its immediate surroundings (the skin zone). This causes a decrease in the efficiency of the well (a decrease in the pumped quantity, a decrease in the specific yield, an increase of the drawdown in the well, and creation of the skin zone). The increased hydraulic gradient in the skin zone causes an increase in the inflow rate to the well, thereby inducing the movement of fine material towards the casing. This material can clog the well casing and injection ports, which is compounded by an increase in chemical and biological plugging of the skin zone. In cooperation with the company SONIC Technologies, GmbH. (Sailauf, Germany), an experimental ultrasonic technology-based well rehabilitation assembly was developed and successfully tested. This article describes the prototype development of the ultrasonic device, including its incorporation into the rehabilitation set and a demonstration of its pilot deployment in the MO-4 pumping well in Czech Republic with an evaluation of the rehabilitation effects using the authors' software (Dtest_ULTRA). Based on visual inspection and the results of hydraulic and geophysical analysis, the high efficiency of the tested technology was demonstrated in virtually all monitored parameters, where an improvement in the range of 25–55% compared to the original condition was identified.

Keywords: additional resistances; hydrodynamic well test; physical rehabilitation; ultrasound; software

Introduction

The exploitation of groundwater reserves is currently increasing. This increase also applies to the use of groundwater for drinking purposes. Moreover, the average age of water wells in Europe is steadily increasing (Abramova, Abramov, Bayazitov, & Nikonov, 2017), (Houben & Weihe, 2010). During the course of their use, wells experience ageing. The main phenomena of this process are decreasing amounts of water pumped to achieve the same water level reduction in the well and increasing drawdown in the well and its immediate surroundings (the so-called skin zone) for the same amount of water pumped. The consequences of these phenomena include increases in the hydraulic gradient and flow velocity (Mason, Collings, & Sumel, 2004). The specific yield of the well (well efficiency), which is defined as the ratio of the pumped quantity to the drawdown, subsequently decreases (Izadifar, Babyn, & Chapman, 2017). Well ageing is caused by various physical, chemical, and biochemical processes (Van Beek, Breedveld, Juhász-Holterman, Oosterhof, & Stuyfzand, 2009), (Mullakaev, Abramov, & Abramova, 2015), (Houben & Treskatis, 2007), such as encrustation from mineral deposits, biofouling caused by the growth of microorganisms, physical clogging of the nearby wells in which water is transmitted by sediment (well sanding caused by the transfer of fine materials into the well), well-screen or casing corrosion, and the formation of encrustations due to the deposition of carbonates, aluminum hydroxide deposits, and/or iron and manganese deposits (calcium carbonate, iron bacteria, silt, clay, and “slime” are all common well cloggers) (Patzner, Sonic Umwelttechnik: SONIC Information No. E1-09.2009, 2009), (Mullakaev, Abramov, & Abramova, Ultrasonic automated oil well complex and technology for enhancing marginal well productivity and heavy oil well recovery, 2017), (Timmer, Verdel, & Jongmans, 2003), (Houben G., 2003), (Adebayo & Bageri, 2019), (Bageri, Al-Mutairi, & Mahmoud, 2013), (Iskan, Kok, & Bagci, 2007), (Ralph & Stevenson, 1995).

Measures taken to correct these problems are collectively referred to as well rehabilitation (restoration or regeneration) (Houben G. J., 2015). Generally, there are two main categories of well rehabilitation: chemical and physical (mechanical). In chemical well rehabilitation, the encrusting material is dissolved using inorganic or organic acid mixtures, which are pumped into the well and left until the coatings are dissolved. The different chemical methods used for rehabilitation vary in terms of solvent composition and the way the solvent is introduced into the filter gravel (Van Beek, Breedveld, Juhász-Holterman, Oosterhof, & Stuyfzand, 2009). Chemical rehabilitation has the major disadvantage that most such chemicals are harmful to the environment.

Physical methods include attaching a brush to a drill with high pressure jetting, hydrofracturing, and surging. In recent years, one of the technologies categorized as a physical method, the ultrasonic method, has begun to be used for well rehabilitation (Zhu, et al., 2021), (Payne, Quinnan, & Potter, 2008). This relatively new technology was previously studied and applied to oil wells (Feng, Mal, Kabo, Wang, & Bar-Cohen, 2005), (Mullakaev, Abramov, & Abramova, 2017), (Abramov, Mullakaev, Abramova, Esipov, & Mason, 2013), (Abramov, et al., 2016), (Mullakaev M., Abramov, Abramov, Gradov, & Pechkov, 2009), (Abramov, et al., Sonochemical approaches to enhanced oil recovery, 2015), (Mohsin & Meribout, 2015) but is also now applied to water well rehabilitation (Hamida & Babadagli, 2007), (Petrauskas, 2009), (Daghooghi-Mobarakeh, et al., 2020), (Aarts, Gijs, Bil, & Bot, 1999). Hydrodynamic tests, especially pumping tests, are used to evaluate the effectiveness of well rehabilitation. Hydrodynamic tests are carried out to determine the hydraulic parameters of the groundwater aquifer (hydraulic conductivity, transmissivity, and storativity), and to determine the parameters of the pumped well itself (the coefficient of up-to-date resistances, the so-called skin factor, and well storativity). In 1935, Theis (Theis, 1935) published a solution for the basic equation describing the unsteady radially symmetric flow to an ideal well for a reservoir with a stressed surface based on idealized assumptions. Theis used an analogous equation for heat transfer through a solid medium to describe the groundwater flow through a porous medium. This solution is used to determine the transmissivity and storativity of the aquifer for a well with no additional resistances and a negligibly small radius. This method is known as the Theis-type curve method. Cooper and Jacob (Cooper & Jacob, 1946) simplified the Theis well function. For longer pumping test times a linear segment of drawdown vs. the logarithm of time develops during drawdown; only the first two terms are retained from the Theis well function (the error in the calculations must be less than 0.01–0.25% for the argument of the Theis function).

In real wells, pumping-test progress is significantly affected by additional resistances (expressed by the skin effect). Van Everdingen (Van Everdingen, 1953) and Hurst (Hurst, 1953) were the first to introduce the additional resistances of the well and its immediate surroundings in oil-well calculations. Hawkins (Hawkins Jr., 1956) introduced additional resistances in calculations as a zone around the well with altered hydraulic conductivity (K). In the initial part of the pumping test, the actual well volume (called wellbore storativity) has a significant influence on the time course of the drawdown, which was first addressed in underground hydraulics by Papadopoulos and Cooper (Papadopoulos & Cooper, 1967) and then in an oil field by Ramey (Ramey H. J., 1970). The basic solution of the equation for an unsteady radially symmetric fluid flow to a complete well with consideration of additional resistances and the effect of

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

the well's own volume was published in 1970 by Agarwal et al. (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970). Subsequently, a number of authors derived various procedures and methods in this field—e.g., using type curves to determine the additional resistances and wellbore storativity from a pumping test (Fan & Rarashar, 2020), (Patel & Singh, 2016) , (Liu, Li, Xia, Jiao, & Bie, 2016) , (Watlton, 2007) , (Batu, 1998) , (Kresic, 2007) , (Bourdet, Whittle, Douglas, & Pirard, 1983) , (Novakowski, 1989) , (Yeh, Yang, & Peng, 2003). The Laplace transform was one of the first techniques used to solve the basic partial differential equation of steady-state, radially symmetrical inflow to a well (see van Everdingen and Hurst (Van Everdingen & Hurst, 1949)). The Stehfest algorithm 368 (Stehfest, 1970) was used to invert the Laplace transform in software Dtest_ULTRA.

The authors of this paper developed software using the Laplace transform and the Stehfest algorithm Dtest_ULTRA, which can be used to evaluate the “skin factor” before and after rehabilitation and from the portions of pumping tests where the line segments cannot be evaluated by the classical Cooper–Jacob method (Holub, Pech, Kuraz, Maca, & Kahuda, 2019), (Ficaj, Pech, & Kahuda, 2021).

Materials and Methods

Ultrasound

Ultrasound refers to a mechanical wave caused by the mutual vibrations of elastic particles with frequencies higher than 20 kHz—i.e., outside the range of human hearing. Depending on the frequency, ultrasonic waves are divided into one of three categories: power ultrasound, with a frequency of 20–100 kHz; high-frequency ultrasound, with a frequency of 100 kHz to 1 MHz; and diagnostic ultrasound, with frequencies of 1–500 MHz. The speed of wave propagation increases with greater environmental density (i.e., closer particle spacing). Thus, waves will propagate slowest in gases, faster in liquids, and fastest in solids. The source of artificially generated ultrasound is an ultrasonic generator. For low-intensity ultrasound (Mason, Collings, & Sumel, 2004), these generators include whistles, tuning forks, and sirens that are capable of generating frequencies <200 kHz. For higher frequencies, electromechanical (piezoelectric) or magnetostrictive generators (transducers) are used. A magnetostrictive converter works on the principle of changing the dimension of the ferromagnetic material when placed in an alternating magnetic field. The propagation speed of the ultrasonic wave depends on the elasticity and density of the medium through which it passes (Jüttnerová & Bryjová, 2016). For water, the propagation speed of ultrasonic waves is 1480 m/s.

Ultrasonic oscillations can be generated by three types of generators:

1. Mechanical (small tuning forks and whistles: low frequency and power);
2. Magnetostrictive (oscillations around an iron rod in the magnetic field of an electromagnet powered by alternating current: high power but with a frequency only up to 100 kHz—used in dentistry and surgery);
3. Piezoelectric (a silicon wafer connected to electrodes with an alternating voltage applied that oscillates at the same frequency as the voltage, converting the energy from electrical into mechanical energy that vibrates the surrounding environment—used for diagnostic and therapeutic purposes).

High frequency will create very short-wavelength ultrasonic waves where pressure changes at the level of MPa occur at higher intensities.

1. Thermal effects: The energy of the wave is directly proportional to the square of the frequency. There is considerable absorption at the interface of tissues with different levels of acoustic impedance (soft tissue X bone = periosteal pain).

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

2. Mechanical effects: Passage of the ultrasound wave through the environment results in local pressure changes (MPa/mm). Mechanical waves, and therefore sound, propagate in all states of matter through bonds between particles. When the energy of the oscillatory motion is transferred to adjacent particles and results in propagation of the oscillation, then the medium is characterized as elastic.
3. Physicochemical: Ultrasound has dispersive effects, which means that fine suspensions, emulsions, foams, etc. can be prepared with its power in addition to coagulative effects (e.g., used for cleaning gases).
4. Biological: Up to an intensity of 3 W/cm^2 , ultrasound has biopositive effects, such as the acceleration of metabolic exchange. At intensities greater than 3 W/cm^2 , these effects result in irreversible morphological changes, such as breakdown of the cell nucleus and the thermal coagulation of proteins.

One of the limiting factors when using ultrasonic waves for the rehabilitation of production wells is the depth of penetration of the wave through the environment, which is inversely related to the frequency of the ultrasonic wave. For casing and gravel backfill, this is, in practice, 25–35 cm, which corresponds to the distance at which the wave amplitude drops to half its original value in a given environment. In principle, less kinetic energy is absorbed in liquids and solids than in gases. The effects of ultrasound are both mechanical and thermal. The propagation of ultrasound through a medium causes the medium's molecules to vibrate, resulting in rapid pressure changes. As ultrasound passes through organic tissues, much of the energy is converted to mechanical energy, vibrating the tissues and leading to changes in the properties of the cell membranes (physicochemical effect), the splitting of high molecular weight substances (chemical effect) (Houben & Treskatis, 2007), and the absorption of mechanical energy (biological effect).

In the rehabilitation of wells using ultrasonic technology, four main processes are used:

1. The removal of hard encrustations due to differences in the deformation of the grains of the gravel filter and surface precipitants. This is caused by the difference in mechanical deformation at the material interface.
2. The liquefaction of organic molecules through mechanical stress caused by ultrasound transforms of large organic molecules into smaller ones. This process yields a certain degree of lethality for viruses and bacteria.
3. Ultrasound energy leads to movements in the molecular structure of the encrustation. Consequently, abrasion occurs within the gravel, which grinds away the coating.

4. Cavitation. The so-called cavitation effect is effective up to a depth of approximately 50 m. Cavitation removes material adhering to the gravel surface.

Additional Resistances

Well intervention essentially involves reducing the size of additional depressurization pores in the well and its immediate surroundings. The term “additional resistances” refers to a set of phenomena that cause a deviation in the measured values of water drawdown at the real well compared to the theoretical drawdown obtained by assuming an ideal (without additional resistances) model of water flow to the full well. The additional resistances cause most wells to lose their specific capacity with time. This is primarily due to ageing of the wells through mechanical, chemical, and biological processes. Some types of additional resistances can arise during the drilling process, leading to shortcomings and imperfections in drilling techniques and technologies, especially for the equipment used for the well itself, e.g., a reduction in permeability in the immediate vicinity of the well due to intrusion of the drilling fluid into the porous water-saturated environment during rotary drilling, resulting in so-called “water-logging.” This can be caused by a “mud crust” or by impact drilling, where the porous environment in the vicinity of the well is compacted, resulting in a reduction in permeability (Adebayo & Bageri, 2019), (Bageri, Al-Mutairi, & Mahmoud, 2013) , (Patel & Singh, 2016) , (Zhang, Guo, Liang, & Liu, 2021).

Other causes can include various hydromechanical, chemical, and biological phenomena that may occur in and around the well during the exploitation of the well. Knowledge of the magnitude of the additional drawdown or the additional drawdown attributable to the action of the up-to-date resistances is essential in determining the efficiency of the well and can be used to monitor the ageing process of the well.

Chemical degradation is most commonly observed in areas where the flowing water contains excessive dissolved minerals. This type of degradation is caused by the deposition of minerals on different parts of the well. The most common substances are calcium carbonate, magnesium carbonate, calcium sulphate, and manganese and iron hydroxides.

Biodegradation is caused by bacteria, which occurs naturally in most aquifers. These bacteria can be divided into three basic groups. The first and most widespread group includes iron bacteria. These bacteria cause the oxidation of iron compounds and produce ferric hydroxide, which is a red inorganic substance deposited by a biological process substance. This substance has a slimy character and is deposited on the walls of the wellbore, the individual pump sections, and the surrounding area of the well. If exposed to air, ferric hydroxide solidifies and can cause much more damage. The

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

second group includes bacteria that reduce sulfur compounds. These bacteria can be found in extremely acidic waters—even those with a pH equal to 1. The last group includes slime-producing bacteria, which coexist with the abovementioned types of bacteria. The most commonly produced slime affects parts of the pump, but slime can also clog the filter casing of the well and the pores in the aquifer surrounding the well. All of these degradation modes yield changes in the hydraulic conductivity of parts of the well and the adjacent aquifer. The sum of all these factors is called the skin effect. Parts of the additional resistance are caused, for example, by clogging (damage) of the well—i.e., blockage of the pores by fine material, which reduces the flow rate of the porous medium; by rock or silt particles becoming trapped in the filter holes, including chemical encrustation and blockage of the filter holes by microorganisms and bacteria; or by incomplete opening of the aquifer by the well (a so-called incomplete well). Each additional element of resistance causes an incremental increase in the water level drawdown in the well.

The total aggregate drawdown caused by the additional resistances is calculated as

$$s_{skin} = \sum_{i=1}^n s_i \quad (IV - 1)$$

where n is the number of partial additional resistances at the well and in its vicinity, s_{skin} is the drawdown caused by these additional resistances (m), and s_i is the drawdown caused by the i -th additional resistance (m).

The terms “additional drawdown” and “additional resistances” were first defined for steady flow by van Everdingen (Van Everdingen, 1953), who expressed the drawdown due to the total additional resistances with the following relation

$$s_{skin} = \frac{Q}{2\pi T} SF \quad (IV - 2)$$

where Q is the pumping rate (m^3/s), T is the transmissivity of the aquifer (m^2/s), and SF is the skin factor (-).

Figure 1 presents the differences in the course of the piezometric level for an ideal pumped well and a well with additional resistances.

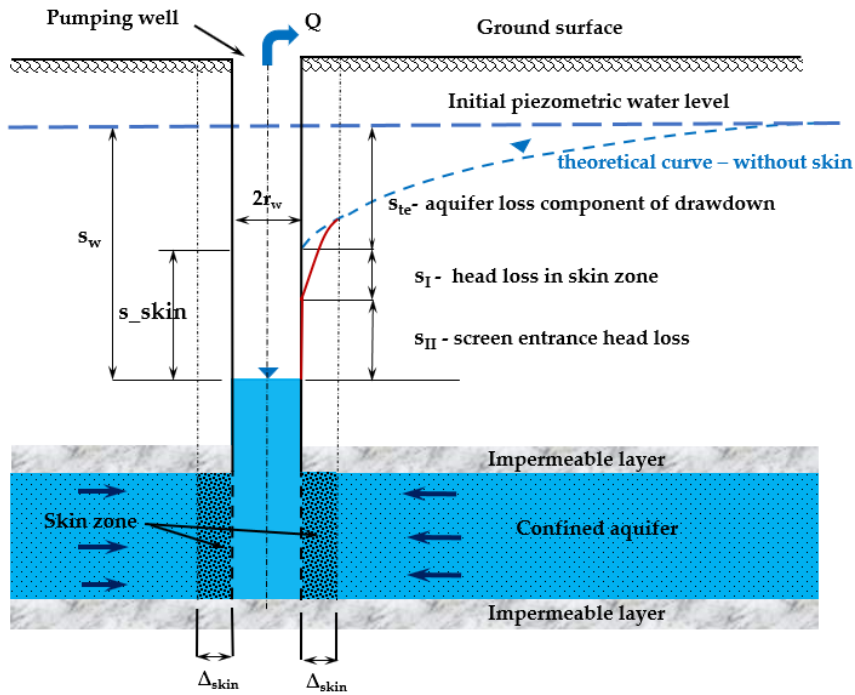


Figure 1. Well diagram with additional resistances on the well wall and in the damaged zone.

$$s_w = s_{te} + s_{skin} \quad (IV - 3)$$

where s_w is the total drawdown (m) and s_{te} is the theoretical drawdown (without additional resistances) (m).

As a characteristic of the well condition, we use the specific yield of the well, which is the ratio of the amount of water pumped from the well to the total drawdown (Sterrett, 2007)

$$q = \frac{Q}{s_w} \quad (IV - 4)$$

where q is the specific yield (m^2/s).

A typical plot of a pumping test, shown in semilogarithmic terms as drawdown vs. a logarithm of time, is illustrated in Figure 2, along with a section that can be evaluated by the Cooper–Jacob method.

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

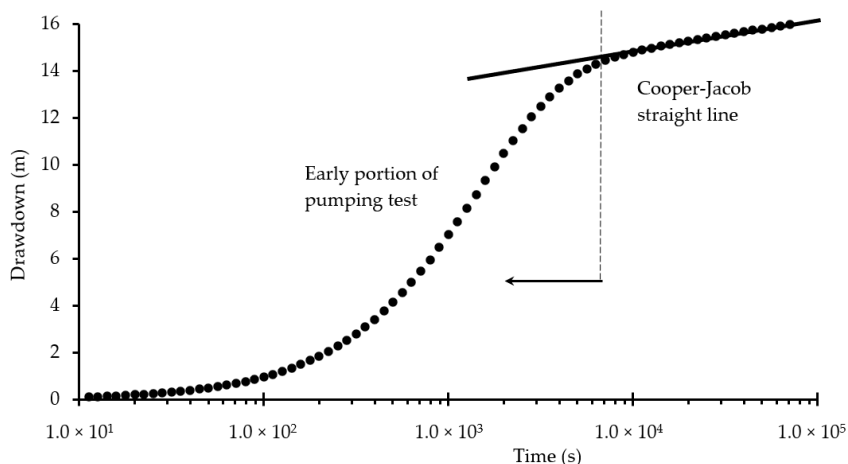


Figure 2. Diagram of a pumping test with the initial section and the Cooper–Jacob section.

For the Cooper–Jacob section (Figure 2), we can use the relation (Horne, 1990) of the form for groundwater to evaluate the skin factor

$$s_{skin} = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{2.246Tt}{r_w^2 S} + 2SF \right) \quad (IV - 5)$$

where S is the aquifer storativity (-), r_w is the well radius (m), and t is time (s).

Next, we express the coefficient of additional resistances (skin factor)

$$SF = \frac{2\pi T s_w}{Q} - \frac{1}{2} \ln \frac{2.246Tt}{r_w^2 S} \quad (IV - 6)$$

In this study, if no section was evaluable by the Cooper–Jacob method, the skin factor was determined in the field example using the Dtest_ULTRA software described in (Ficaj, Pech, & Kahuda, 2021).

The article used the following dimensionless parameters (Ficaj, Pech, & Kahuda, 2021), (Kahuda & Pech, 2020)

- Dimensionless time

$$t_D = \frac{Tt}{r_w^2 S} \quad (IV - 7)$$

- Dimensionless radius

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (IV - 8)$$

where r = distance from pumped wellbore (m).

- Dimensionless drawdown

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

- Dimensionless drawdown at a well

$$s_{wD}(r_D = 1, t_D) = \frac{2\pi T}{Q} (s_w(t)) \quad (IV - 10)$$

- Dimensionless wellbore storage (Patzner, 2009)

$$C_D = \frac{C}{2\pi S r_w^2} \quad (IV - 11)$$

where the C is the unit factor of the wellbore storage (m^2), $s(r, t)$ is the drawdown at distance r and time t (m), and s_w is the drawdown at a well (m).

For unsteady flow in terms of dimensionless parameters, the well-known diffusivity equation in the radial coordinates has the form (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970), (Liu, Li, Xia, Jiao, & Bie, 2016), (Ficaj, Pech, & Kahuda, 2021), (Park & Zhan, 2002), (Chen & Chang, 2006), (Pasandi, Samani, & Barry, 2008)

$$\frac{\partial^2 s_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial s_D}{\partial r_D} = \frac{\partial s_D}{\partial t_D} \quad (IV - 12)$$

Initial and boundary conditions are (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970), (Ficaj, Pech, & Kahuda, 2021)]

$$s_D(r_D, t_D = 0) = 0 \quad (IV - 13)$$

$$s_{wD}(r_D = 1, t_D = 0) = 0 \quad (IV - 14)$$

The outer boundary condition is

$$s_D(r_D, t_D) = 0 \quad (IV - 15)$$

The inner boundary condition if the effect of wellbore storage plays a major role and the skin factor is constant (Van Everdingen, 1953)

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

$$s_{wD} = s_D + (r_D \frac{\partial s_D}{\partial r_D})_{r_D=1} SF \quad (IV - 16)$$

$$C_D \frac{\partial s_D}{\partial t_D} - \left(r_D \frac{\partial s_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = 1 \quad (IV - 17)$$

The basic Equation (IV-12) is solved using a Laplace transform. The following type of transform function is used to convert the partial differential equation in dimensionless parameters into an ordinary differential equation (Yeh & Wang, 2013), (Sethi, 2011):

$$(p) = L(f(t)) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt \quad (IV - 18)$$

The transformed solution in the Laplace domain for dimensionless wellbore drawdown is

$$\overline{s_{wD}} = \frac{K_0(p^{1/2}) - SF p^{1/2} K_1(p^{1/2})}{p [p^{1/2} K_1(p^{1/2}) + C_D p^{1/2} (K_0(p^{1/2}) + SF p^{1/2} K_1(p^{1/2}))]} \quad (IV - 19)$$

where p is the Laplace operator; K_0 and K_1 are the zero and unit order modified Bessel functions, respectively; and SF is the skin factor (-).

Dimensionless drawdown at a well and s_{wD} was obtained by Stehfest numerical inversion (Watlton, 2007)

$$s_{wD}(t_D) = \frac{\ln(2)}{t} \sum_{i=1}^N V_i \overline{s_{wD}}(p) \quad (IV - 20)$$

$$p = i \frac{\ln(2)}{t} \quad (IV - 21)$$

$$V_i = (-1)^{\frac{n}{2}+i} \sum_{k=\lceil \frac{i+1}{2} \rceil}^{\min(i, \frac{n}{2})} \frac{k^{\frac{n}{2}} (2k!)}{\left[\left(\frac{n}{2} - k \right)! k! (k-1)! (i-k)! (2k-i)! \right]} \quad (IV - 22)$$

s_{wD} is the dimensionless wellbore drawdown in a real domain, and $\overline{s_{wD}}$ is the solution of the dimensionless well drawdown for r_D and t_D in Laplace space (-).

For drawdown at a well it is:

$$s_w(r_w, t) = \frac{Q}{2 \pi T} \sum_{j=1}^k \text{con}(j, k) \sum_{i=0}^m \binom{m}{i} (-1)^i.$$

$$\frac{K_0(c^{1/2}) - SF c^{1/2} K_1(c^{1/2})}{c [c^{1/2} K_1(c^{1/2}) + C_D c^{1/2} (K_0(c^{1/2}) + SF c^{1/2} K_1(c^{1/2}))]} \quad (IV - 23)$$

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

$$\text{con}(j, k) = \frac{(-1)^{j-1}}{k} \binom{k}{j} j m^{k-1} \frac{\ln 2}{t_D} \frac{(2m)!}{m!(m-1)!} \quad (IV - 24)$$

Equation (IV - 24) was used in the software Dtest_Ultra (Ficaj, Pech, & Kahuda, 2021).

Results

Development of Ultrasonic Well Recovery Equipment

In 2017, work began on the development of an experimental ultrasonic technology-based well rehabilitation assembly. The development of the actual ultrasonic wave emitters, including their installation and wiring, were carried out by SONIC Technologies, GmbH. from Germany. Based on the requirements for the performance and applicability of the device under hydrostatic pressures up to 25 bar, the ultrasonic probe was designed based on the principle of magnetostrictive emitters, including the appropriate energy transfer and control assembly (**Figure 3**).



Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

Figure 3. Laboratory testing of ultrasonic emitters (SONIC Technologies, GmbH, Sailauf, Germany).

The core of the ultrasonic device features individual switching power supplies for controlling the individual power paths of the ultrasonic emitters, which are connected by a paired cable via a low-current control. The effective frequency of the emitters is fixed at 20 kHz, and the switching frequency is optimized for an ideal power-to-performance ratio. The switching frequency was thus developed with the practical efficiency of the application in mind, and safety features were added to enable early shutdown in the event of insufficient cooling of the equipment or incorrect operation. The ultrasonic emitters are housed in a submersible probe. In addition to the specifics of the actual wave generation and effects, the engineering design also addressed the issues of the power supply, switching, control, cooling, and flushing within the reclaimed facility.

In 2017, the first field deployment tests of the pre-prototype were conducted (based on an older design by N. Patzner, Sonic Umwelttechnik, GmbH), but due to its inconvenient operational dimensions, the prototype was only a test platform for further development. The test model demonstrated the basic functional characteristics of the method in conjunction with a submersible pump and the effectiveness of the tested principles. Shortcomings, however, were observed in the power transfer and the controls for the individual emitters. The testing was carried out in a shallow test well within the Baugrund Süd GmbH site at Bad Wurzbach, Germany. In 2018 and 2019, prototypes 1 and 2 were successively constructed and placed in a submersible probe. Development of the ultrasonic device was completed with prototype-3 in 2020 (Patzner, 2009).

Machine Platform

The supporting machine platform provides the necessary manipulation, control, and resource base for operation of the probe with the ultrasonic wave emitter assembly and, at the same time, enables the integration of equipment for other rehabilitation techniques (the basic spectrum of mechanical and possibly chemical methods), which are combined in operational practice for accessing the rehabilitated surfaces of the receiving wells for input of the ultrasonic probe. The rehabilitation assembly was developed to be autonomous, i.e., as independent as possible in terms of supporting other machinery and transport equipment, as well as capable of operating in conditions without a sufficiently powerful electrical connection. The machine platform includes a standardized range of equipment and features:

- A crane with minimum lifting capacity of 2500 kg, possible movement in two axes, and minimum lifting capacity height of 12 m;

- An AC power generator with an effective power of 40 kW and 32 A;
- A machine winch for the power cables of the ultrasonic emitters;
- A steel pipe assembly with a total length of 200 m;
- The possibility to connect a towed compressor.

Controls and Safety Features

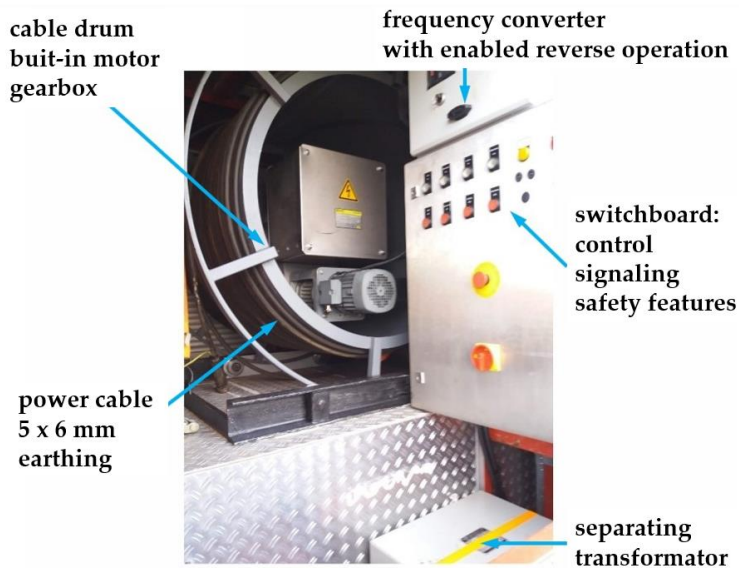
Specific controls and safety features were developed for the ultrasonic rehabilitation assembly and were installed on the machine platform:

- Electrical switchboard—This device allows the transfer of power energy from its own aggregate or an external source to the ultrasonic emitters and the operating pump. This switchboard is equipped with control and monitoring elements for operation of the individual emitters, controls, and pump controls, as well as integral safety elements for (a) manual and (b) automatic stopping of the cable winding in cases that exceed the safe tension force.

Frequency converter—This is the most basic part of the power winch conversion cable and allows one to control the winding speed and reverse the cable (i.e., unwinding).

- Power cable: Based on the calculated dimensions for the transmission of 15 kW of ultrasonic power from the emitter and submersible pump, we used a 5 m × 6 mm power cable with a grounding option.

Figure 4 shows the modifications of the control and safety elements.



Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

Figure 4. Operation control and safety elements.

The technical data for the system are listed in **Table 1.**

Table 1. Technical data for the ultrasonic set.

Technical Data for Individual Emitter	
Operating frequency	20 kHz
Rated power	2500 Watt
Peak power	4000 Watt
Weight	approx. 18 kg
Sound emitting surface	85 × 185 mm
Sound energy (nominal/peak))	12/25 W/cm ²
Modulation	double half wave
Ultrasonic technology	magnetostriction
Horizontal range	up to 350 mm from the borehole wall
Technical Data of the Ultrasonic Device	
Type	B 20/6
Number of ultrasonic emitters	3
Total power	7.5 KW
Power source	15 kVA
Main voltage	230/100/50 Hz
Weight	120 kg
Length	160 cm
Weight of switching box	approx. 200 kg
Weight of cables	2 kg/m

The developed ultrasound probe ready for field application is shown in **Figure 5.**

The technical data for the system are listed in **Table 1**.

Table 1. Technical data for the ultrasonic set.

Technical Data for Individual Emitter	
Operating frequency	20 kHz
Rated power	2500 Watt
Peak power	4000 Watt
Weight	approx. 18 kg
Sound emitting surface	85 × 185 mm
Sound energy (nominal/peak))	12/25 W/cm ²
Modulation	double half wave
Ultrasonic technology	magnetostriction
Horizontal range	up to 350 mm from the borehole wall
Technical Data of the Ultrasonic Device	
Type	B 20/6
Number of ultrasonic emitters	3
Total power	7.5 KW
Power source	15 kVA
Main voltage	230/100/50 Hz
Weight	120 kg
Length	160 cm
Weight of switching box	approx. 200 kg
Weight of cables	2 kg/m
Cable reel weight	approx. 150 kg
Outer diameter	140 mm
External dimensions of the switch cabinet	800 × 1800 × 600 mm
Applicability for bore diameter	160–1000 mm
Maximum borehole depth	250 m
Crane capacity	2500 kg
Steel pipe assembly	lengths of 200 m
Alternating current generator	min power 15 kW and 25 A

The developed ultrasound probe ready for field application is shown in **Figure 5**.

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test



Figure 5. Ultrasonic probe in action (prototype by SONIC TECHNOLOGIES, Inc.).

Field Deployment of the Ultrasonic Equipment during the MO-4 Well Rehabilitation and Evaluation of the Effects of the Rehabilitation Intervention

Case Study

The MO-4 well is located in North Bohemia (Czech Republic—50.50 N, 13.95 E) within the Vlastislav pumping site and operated by a major regional waterworks company (**Figure 6**).

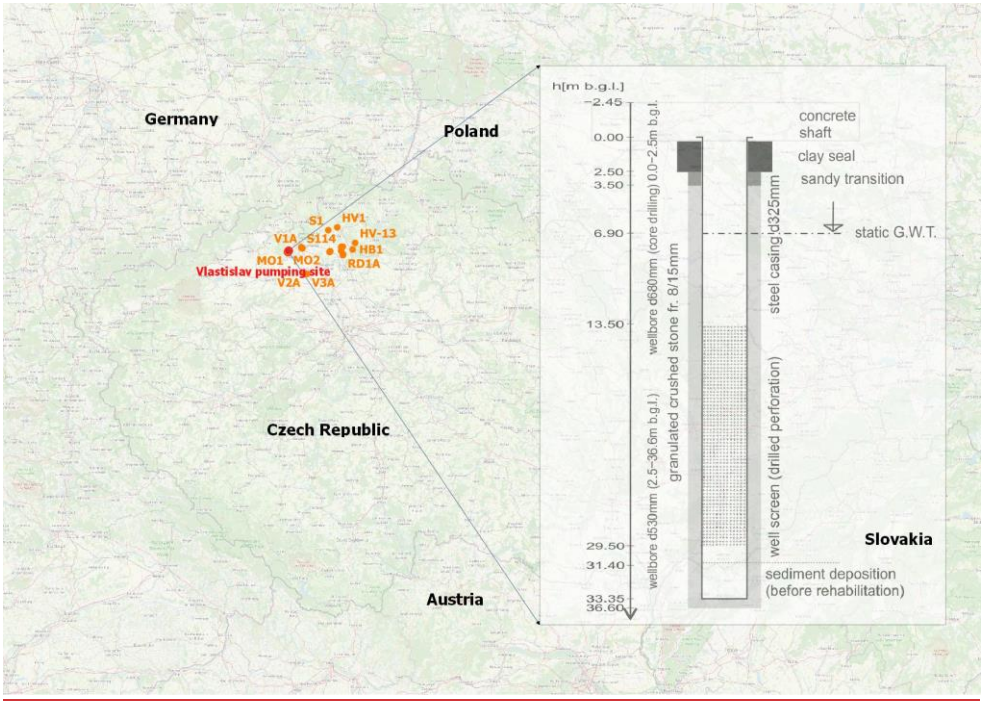


Figure 6. Location of the MO-4 well and a schematic view of the well.

The site was established in the 1960s by utilizing a spring tributary (a so-called “chapel”) to a local creek called “Modla”. In total, five new pumping wells were constructed to enhance the pumping capacity of the site. In 1967, the MO-4 pumping well was drilled to a final depth of 36 m. The drilled diameter is 530 mm, with a steel-casing diameter of 325 mm. The well screen consists of a drilled perforation, and the filter is made of granulated stones fractionated to 8/15 mm. The pumping well is screened in a phreatic aquifer, with an initial pumping capacity estimated at up to 5 l/s.

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

Geology and Lithology

From a hydrogeological point of view, the well is located in the northwest corner of a regional Turonian (Late Cretaceous) aquifer with a local depth of no more than 13 m—see: <https://mapy.geology.cz/geocr50/?extent=-772846.0823%2C-995356.9083%2C-765729.1785%2C-991236.3851%2C102067> (accessed on 23 August 2021). This layer overlays a similarly cornered and small Cenomanian aquifer, 20 m in depth. The underlying Permian (Paleozoic) aquifer has only a limited hydrogeological influence (1–2 m thickness), and there are several fractures in the surrounding porous material with primarily local importance. The aquifer is vertically limited by an underlying bedrock layer of Proterozoic gneiss, and weathered bedrock is present at a depth of about 55 m. The water quality meets the indicators necessary for a general water supply. Due to the depth of the Cretaceous aquifer (related to its age and lithological profile), the water hardness is moderate and characterized by significant amounts of Ca, Na, and Mg, and elevated concentrations of Fe. The site is located at an elevation of 313 m a.s.l.

Well Rehabilitation

The specific objective in the rehabilitation of the MO-4 Vlastislav pumping well was the deployment of the ultrasonic method in an environment where no other techniques were actually applicable (except the air lift). Due to the significant age and poor technical condition of the well, the use of other mechanical or chemical techniques threatened to irreversibly damage the facility, which still serves as a source of drinking water supply. Although in many cases the combination of ultrasonic methods with other techniques may be recommended (from an operational point of view) to synergize their effects, here the specific effect of ultrasonic well rehabilitation could instead be investigated for the MO-4 Vlastislav well. To evaluate the effects, all available methods were deployed: visual, hydrodynamic, and geophysical.

During March 2021, the MO-4 well underwent a complex mechanical rehabilitation. The initial visual inspections and geophysical well-logging measurements (carried out prior to the actual rehabilitation) highlighted the poor condition of the well casing, indicating a danger of collapse. Brush-cleaning and high-pressure water jet methods were excluded from the schedule. After the initial airlift pumping of stranded sedimentary deposits, the experimental ultrasonic method was carried out using a prototype probe constructed by SONIC TECHNOLOGIES, GmbH (Sailauf, Germany), consisting of three magnetostrictive transducers with a 20 kHz frequency and a total output of 7.5 kW together with the simultaneous operation of a submersible pump. The rehabilitation equipment is shown in **Figure 7**.



Figure 7. Rehabilitation set built within the project.

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

Finally, a second air-lift pump was deployed to remove the residual sediments and those induced by ultrasound. A comparison of the conditions inside the well before and after rehabilitation at different depths is shown in **Figure 8**. A 3Dgeo color PAL-format immersion camera with a resolution of 750×600 (96 dpi) was used to capture images of the site.

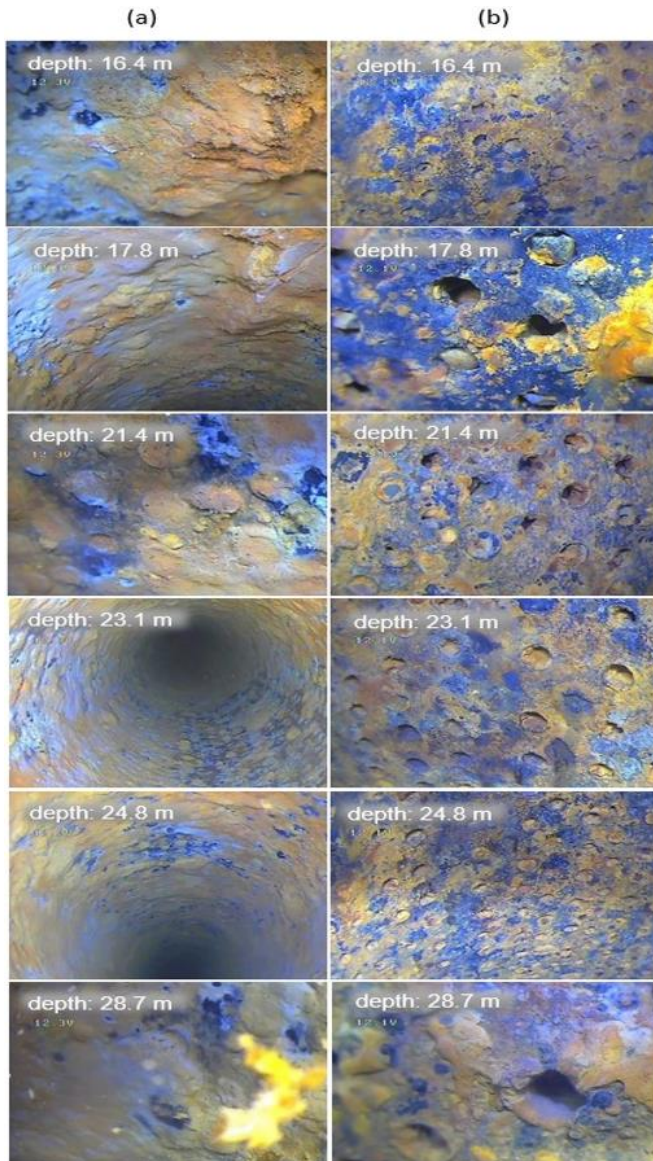


Figure 8. Example of a camera inspection of the interior of well MO-4 at different depths before (a) and after (b) rehabilitation

Well Logging

Before and after the ultrasonic rehabilitation there was a range of comparative geophysical well-logging methods applied. The measurements were performed by SG GEOTECHNIKA, a.s. (Geologická 988/4, 152 00 Praha 5 – Hlubočepy, Czech Republic) and the aim of the procedure was mainly to verify the current technical condition of the borehole and its functionality after the rehabilitation. The measurements intended:

- The verification of the well technical conditions (internal, external equipment, diameters, perforations, depth);
- The verification of the internal space of the borehole by optical inspection;
- The determination of water inflows and their relative yields, and the clarification of the groundwater flow regime into the well.

The Inspection of Well Gravel Filter

The applied methods included:

- Gamma logging;
- Neutron neutron logging;
- Gamma gamma logging in density modification (density logging)—mainly to detect open spaces outside the well casing;
- Cavernometry—to verify the internal diameter of the well casing, possible deviations (broken casing, growths), casing joints, etc.;
- Measurement of physicochemical properties of water (conductivity, temperature, percentage of dissolved oxygen, pH index, oxidation-reduction potential)—to detect possible zonality of water in the borehole (from different inflows);
- Resistivity in the application of the labelled fluid dilution method—to clarify the groundwater and detection of inflows;
- Resistivity in the application of the labeled liquid pumping method—to determine all inflows and their yields.

The measured parameters were compared to the pre-rehabilitation conditions: water physical and chemical properties, water inflow, yield of permeable positions, well filter density, neutron properties of the well casing, natural gamma activity, and the borehole diameter curve (cavernometry). The results were interpreted into the following conclusions:

The removal of sediment from the well bottom increased the available depth from the original 36.0 m to the current 36.5 m, which is 0.5 m more than the declared borehole depth. Comparison of the neutron logging curves showed a slight reduction in signal in the 11–17 m bellow terrain (b.t.) section (a greater proportion of water compared to clay suspension). In the 7.35–10.32 m b.t. section the difference was significant;

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

however, this was influenced by a seasonal rise in groundwater level. The originally dry section is now wetted; therefore there was a significant reduction in the signal on the neutron logging curve in this section.

Regarding the changes in natural gamma activity, some reduction was observed in almost the entire borehole. This would suggest that the casing has been stripped of clay suspension.

A comparison of gamma gamma logging curves before and after rehabilitation clearly showed a density decrease in the 11–23 m section (the section with the main tributaries). This is a significant indication that the well gravel filter has been cleaned of clogging (water in the gravel filter has a lower density than the clay suspension clogging the filter pores).

Of the parameters monitored, there were virtually no changes in the pH. Its depth course and values were almost identical before and after rehabilitation (6.9–7.9 m). There was an increase in the values of the oxidation-reduction potential. It now reaches positive values throughout the entire section up to the end of the well screen at 32 m. This is probably related to the recovery of vertical flow in the well. In the section of full casing there was a sharp drop to slightly negative values. The water temperature at the bottom was similar to that before rehabilitation. However, it was slightly higher in the next section of the borehole, by up to 0.3 °C, which also can be related to the recovery of the flow. The small anomaly on the temperature curve (and on the conductivity curve) is an indicator of significant inflow. The conductivity of the water was already quite high before the rehabilitation: 1070–1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (water with a longer residence time in the rock mass). Sulphates may have contributed to the increased mineralization in this area. Similar values occurred at the water table, whereas in another part of the well the conductivity was even higher, reaching values up to 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. This change was also related to the recovery of natural groundwater flow. The relative significance of the groundwater seepage was lowered, which consequently tended to lead to a lower conductivity.

Significant changes have occurred in the natural groundwater hydrodynamics in the borehole. A new significant inflow has appeared at a depth of 11.95–12.3 m. Water now enters the borehole at a depth of 11.95–12.3 m and flows downwards. Water is added from the sandstone layer at a depth of 17.5–18.0 m (this inflow was also recorded in the first measurement before recovery). As the water continues downwards, water is added from a tributary at 20.2–21.0 m (the upper part of the coarse-grained sandstone layer below the siltstone layer with clay seal—also an inflow already detected in the first measurement). Water from all three tributaries flows through the borehole downwards with a yield of $Q = 7400$ l/day. This is almost 2000 l/day more compared to the flow before well rehabilitation. The groundwater exits the well into a layer of

silty clay at a depth of 29.2–29.7 m, with a slight residue at the end of the perforation at a depth of 32 m.

To verify the inflows and to determine their relative yields, a marked fluid pumping method was performed in the well. The water was pumped for 1.5 h from a depth of 9 m with a constant discharge of $Q = 0.50$ l/s. The water table dropped by $s = 0.51$ m and reached a steady state. An approximate calculation showed an increase in the specific yield of approximately 20% at a pumping rate of $Q = 0.5$ l/s. The new inflow at a depth of 19.95–12.3 m undoubtedly contributes to the increase in the specific yield. The permeable positions, which were already evident when monitoring the natural flow using the marked fluid dilution method, were confirmed. The main inflow appeared to be from the sandstone position at a depth of 17.5–18.0 m. This represents approximately 50% of the total yield of the well. The inflow at 20.2–21.0 m depth contributes approximately 15% of the total well yield and the inflow at 29.2–29.7 m depth contributes 5%. The newly discovered inflow at 11.95–12.3 m depth is quite significant; it contributes 30% of the total well yield. In addition, it was shown that the natural vertical flow of water is merely an overflow between permeable positions. It is not a connection of aquifers with different discharge levels (so-called hydraulic short-circuit), and this is because if the pumping level were lowered by 0.51 m, the direction of water movement would be reversed and water from all tributaries would start to flow towards the pump.

The new inflow of 11.95–12.3 m is beneficial to the well; it is located at a depth where the casing and the water properties of this inflow are not very different from those of the other inflows.

Based on a visual comparison of the results of the submersible camera inspection of the well (**Figure 8**) casing before and after the rehabilitation, it can be concluded that a reduction in mineral encrustations occurred throughout the entire well screen section, i.e., wherever the ultrasonic method was applied. It is estimated (from a camera inspection of the well) that approximately 70–80% of the perforation holes have been reopened, although some of the encrustation remains and therefore there is still a partial restriction of groundwater inflow to the borehole. The greatest difference was observed at 16–20 m below ground level, where (due to the location of the main groundwater inflows) the mineral encrustations reached their greatest thickness and where the geophysical well logging showed a significant inflow recovery as well as a decrease in the well filter gravel pack density. Corrosion holes were found in the profile of the borehole casing as well as the interconnection of some individual perforations.

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

We also compared the turbidity of the water pumped before rehabilitation and after the start of ultrasound rehabilitation (**Figure 9**).



Figure 9. Comparison of turbidity in raw water before (a) and after the start (b) of ultrasound rehabilitation.

Pumping tests were performed on well MO-4 before and after rehabilitation (**Table 2** and **Figure 10**).

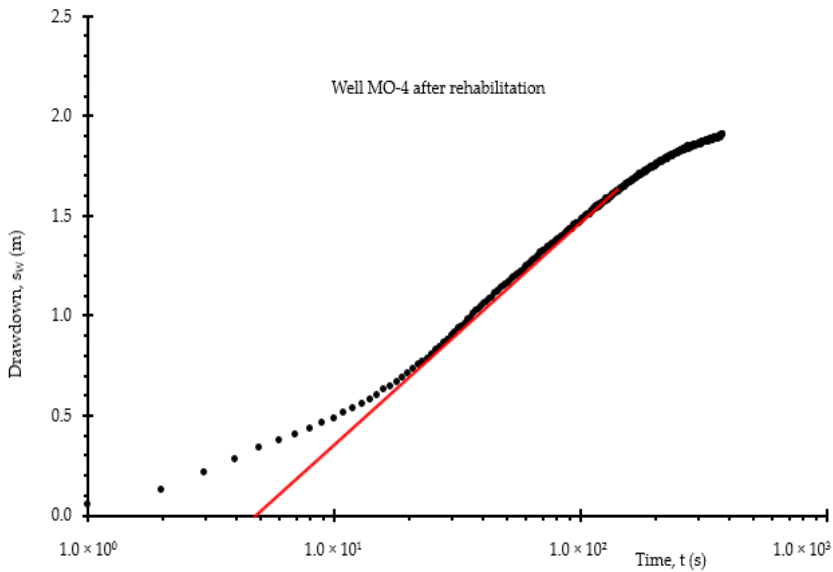
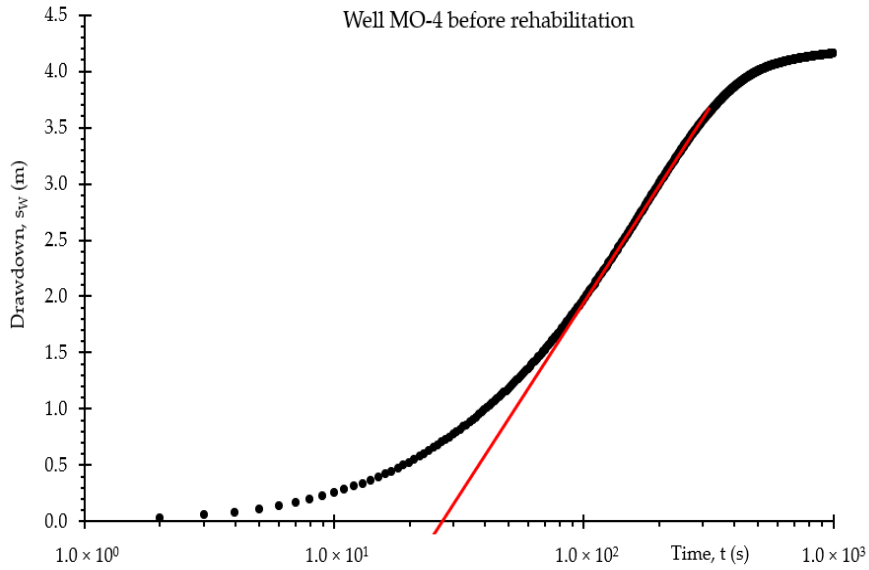


Figure 10. Well MO-4 pumping tests before (a) and after (b) rehabilitation (for the early portion of pumping test the red straight line is used in the software (Ficaj, Pech, & Kahuda, 2021) for evaluation of the skin factor).

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

Table 2. Pumping test parameters before and after rehabilitation.

	Q (m ³ /s)	Length of Pumping Test (s)	max s_{wv} (m)
Before rehabilitation	0.0023	1500	4.2
After rehabilitation	0.0014	1250	2.05

A semilogarithmic plot of reduction vs. a logarithm of time is shown in **Figure 10**. The Dtest_ULTRA software (Ficaj, Pech, & Kahuda, 2021) was used to determine the size of the skin effect. This software is free and subject to a GPLv3 license (the software can be downloaded from this address: <https://github.com/ficaj/pumping-test> (accessed on 23 August 2021)). The software uses the calculation method outlined above by evaluating the skin factor from the first section of the pumping test. The software is thus able to find the equation for the line representing the first line segment (see **Figure 11**). In the case of unusual wells, the user can manually set the position of the straight line for the first line segment (red line) by moving a point on the slider (see **Figure 11**). The software is also capable of evaluating the reach of the depression cone and both the transmissivity and hydraulic conductivity of the aquifer. After the relevant calculations are completed, the user can view all results directly in the program. The project created can then be saved, so the next time the application is switched on, the user can continue working on the project. The software is able to produce a final report (see **Figure 12** and **Figure 13**); the user can preferentially choose which charts are ultimately included in the report. This report can be generated in either .docx or .html format.

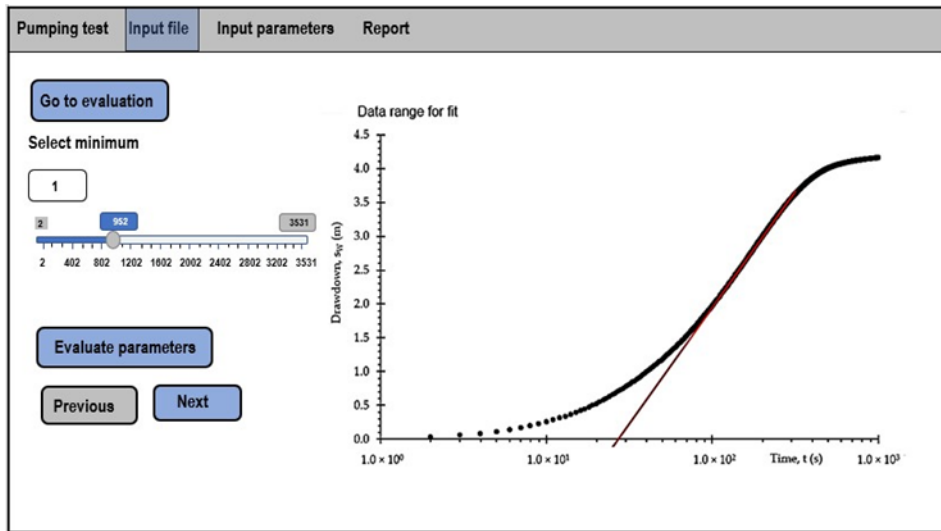


Figure 11. Dtest_ULTRA software demonstration.

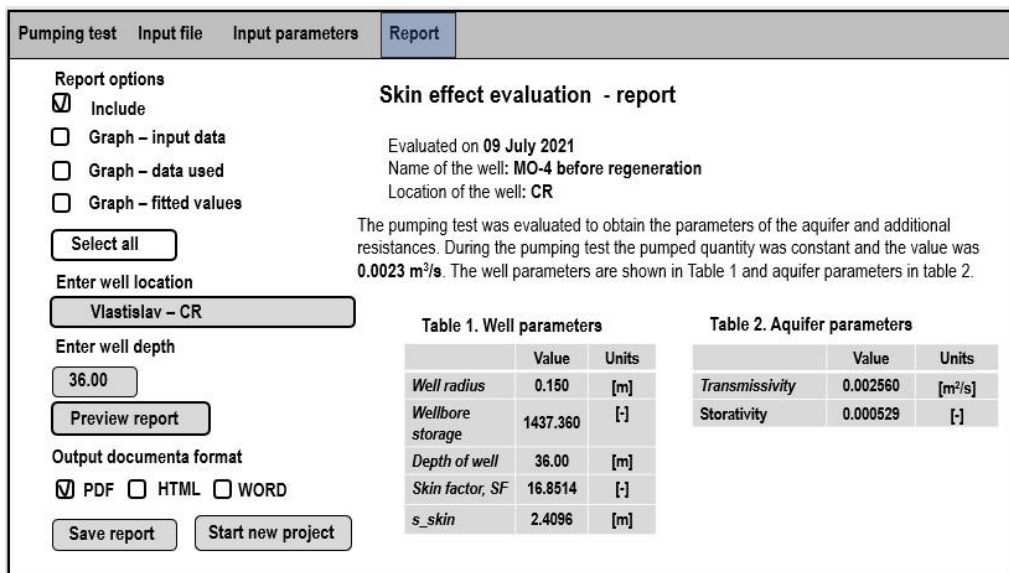


Figure 12. Final report for well MO-4 before rehabilitation.

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

Report options

Include

Graph – input data

Graph – data used

Graph – fitted values

Enter well location

Enter well depth

Output document format

PDF HTML WORD

Skin effect evaluation - report

Evaluated on 11 July 2021
Name of the well: MO-4 after regeneration
Location of the well: CR

The pumping test was evaluated to obtain the parameters of the aquifer and additional resistances. During the pumping test the pumped quantity was constant and the value was 0.0014 m³/s. The well parameters are shown in Table 1 and aquifer parameters in table 2.

Parameter	Value	Units
Well radius	0.150	[m]
Wellbore storage	285.804	[-]
Depth of well	36.00	[m]
Skin factor, SF	12.7059	[-]
s _{skin}	1.05898	[m]

Parameter	Value	Units
Transmissivity	0.002560	[m ² /s]
Storativity	0.000529	[-]

Figure 13. Final report for well MO-4 after rehabilitation.

Discussion

Table 3 outlines the evaluation of the field rehabilitation of demonstration well MO-4 in Vlastislav (Czech Republic) using the developed ultrasonic device. The skin factor SF was determined using the Dtest_ULTRA software (Ficaj, Pech, & Kahuda, 2021)

Table 3. Evaluation of the rehabilitation of well MO-4.

	Q (m ³ /s)	Skin Factor, SF (-)	s _w (m)	s _{skin} (m)	Specific Discharge (m ² /s)
Before rehabilitation (a)	0.0023	16.85	4.2	2.41	5.5.10 ⁻⁴
After rehabilitation (b)	0.0014	12.7	2.05	1.1	6.83.10 ⁻⁴
Difference (a), (b)		4.15	2.15	1.31	1.33.10 ⁻⁴
Improvement by (%)		24.63	51.2	54.36	24.18

Table 3 shows the success rate of the rehabilitation. The skin factor decreased by 4.15 m, and the total drawdown after regenerative intervention was 2.15 m less.

The rehabilitation of well MO-4 in Vlastislav by the ultrasonic method was successful in terms of all monitored parameters. Visual inspection confirmed the removal of 2.5 m thickness of bottom sediments and improved opening of the perforation holes in the

well screen (estimated by 70–80%). The hydrodynamic tests showed a 24.63% reduction in skin effect, a 51.2% drawdown reduction caused by additional resistances, and a 24.18% increase in specific discharge. The geophysical well logging indicated the opening of a new groundwater inflow into the wellbore area and a decrease in the density of the well casing after the rehabilitation.

A set of borehole geophysical measurement methods was applied both before and after rehabilitation (see Figure 14). The gamma borehole geophysical method produced a decrease in the density of the casing space at depth of about 11–23 m, which can be interpreted as clearing of the collared part of the well casing behind the perforated section. The resistivity method also indicated a significant recovery of the inflow at 12–13 m (Procházka, 2021).

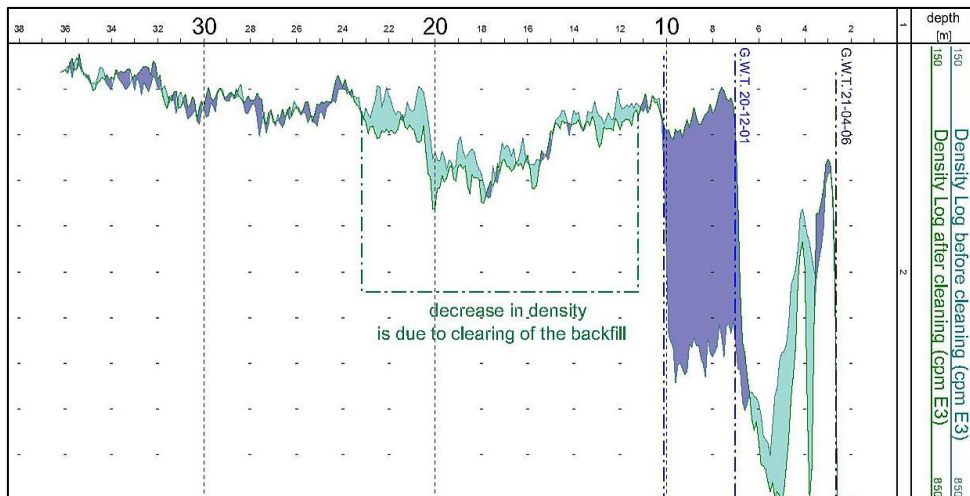


Figure 14. Well gravel pack density log before and after ultrasonic rehabilitation of well MO-4.

The application of ultrasonics in the mechanical rehabilitation of well MO-4 proved effective; however, previous experiments have indicated the necessity of simultaneous water extraction during the operation of ultrasonics. This appears to be because the effect of ultrasound is to release mineral buildup in the form of fine sediment, which is capable of relogging the well casing area without thorough removal. For this reason, it does not seem appropriate to use the ultrasonic impact alone (Zhang, Wang, & Liu, 2003). There is also the question of the correct sequence in the combination of rehabilitation techniques used. The basic mechanical procedures will in principle open up space for targeted application of the ultrasonic method, but the above is related to

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

the nature of the clogging layer (in the case of well MO-4 it was primarily a hard mineral encrustation), the material, and the technical condition of the well equipment. The application of ultrasound itself leads to further deposition of sediments at the bottom of the borehole, so it seems appropriate to repeat, e.g., the air-lift pumping before and after the ultrasonic phase (Abramova, Abramov, Bayazitov, & Nikonov, 2017), (Gungor-Demirci, Lee, Keck, Harrison, & Bates, 2019) , (Mansuy N. , 1999). Last but not least, it is not entirely clear how far the mechanical effect of this method can be achieved, nor how long it can be effective in this way (especially in comparison with other methods) (Houben & Treskatis, 2007).

Estimated cost of MO-4 regeneration: This was an experimental well rehabilitation, but the cost can be estimated to approximately USD 5.00, excluding diagnostic work (camera inspection, pumping tests and geophysical measurements). The total cost would then be approximately USD 5800.

Research in this field will continue—the research team has initiated a follow-up EUREKA USOR research project.

Conclusions

Compared to other common rehabilitation techniques (**Table 4**), the ultrasonic method is particularly effective in reducing hard mineral encrusts and its main effect applies beyond the well casing in the area gravel filter pack, which is equally provided only by chemical methods, but at the cost of dangerous handling and the generation of toxic wastewater, which usually takes longer to remove than the rehabilitation itself. After the use of the ultrasonic method (in common with other mechanical techniques), it is possible to put the production well into operation immediately. However, the ultrasonic method cannot be used alone, but only in combination with the pumping (or air-lift) method, which is used here to remove the material released by the ultrasound impact itself. In the case of a large number of mineral or organic encrustations in the well casing or at the bottom of the well, it is advantageous to combine the ultrasonic method with one of the high-pressure methods (hydro jet...etc.), which have a more significant macroscopic effect on some types of precipitants. The decision on choice of rehabilitation techniques applied needs to be made specifically based on the available information and after an assessment of the current technical condition of the well concerned. Among the most representative results of the experimental well rehabilitation by means of ultrasound are the reduction of additional resistances and the increase of specific yield, which are accompanied by a demonstrable reduction of density in the filter area of the well.

Table 4. Advantages and disadvantages of “ULTRA” solution in comparison to other solutions.

Physical Methods	Impact				PROs	Operation CONs
	Bottom Sediment	Well Casing	Well Filter	Toxic Wastewater		
Air-lift pumping methods	YES	limited	NO	NO	easy	limited dept range
	limited	NO	limited	NO	easy	low effectivity
Brushes	NO	limited	NO	NO	easy	low effectivity, may cause damages
Water jet	NO	YES	limited	NO	effective, thin profile	expensive, may cause damages
Air jet (hydropulse)	NO	YES	limited	NO	effective, thin profile	complex, expensive
Ultrasound	NO	YES	YES	NO	effective, material-friendly	complex, expensive, may cause damages
Chemical methods						
Acidic solvents	YES	YES	YES	YES	effective, cheap	dangerous, creates toxic wastewater
Oxidants	limited	YES	limited	YES	cheap	dangerous,

Similar effects achieved at three other wells in the Czech Republic using a trial deployment of ultrasound regeneration can be found at home.czu.cz/pech (accessed on 23 August 2021) (in Czech).

The ultrasonic method is a suitable addition to the spectrum of ways to rehabilitate wells, not only for extraction wells but also for injection wells. Ultrasonic well rehabilitation has a number of advantages over other methods. However, its effectiveness lies mainly in its ability to degrade clogging growths of inorganic and organic origin within the space behind the casing and outside the well casing. This method neither requires the application of chemical substances nor causes any intrinsic chemical reactions, which not only makes this technique environmentally friendly but also shortens the preparation time needed for the rehabilitation work (compared to chemical methods); furthermore, ultrasonication can be applied without the need for approval from the water authorities or other state administration bodies. The ultrasonic method is also non-destructive to the structural materials of the intake structures. Moreover, it was previously shown (Abramov, Mullakaev, Abramova, Esipov, & Mason, 2013), (Patel & Singh, 2016) that ultrasound does not have a negative effect on

Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test

the well equipment, regardless of the material used (e.g., PVC, PE, ceramic, wood, steel, copper, resin-bonded gravel screens, or coiled wire). This method does not put any strain on the well equipment, the casing, or the surroundings, thereby prolonging the operational lifetime of the containment objects. The effect of ultrasound is immediate and effective and can significantly reduce the time required for carrying out recovery efforts.

Ultimately, within the framework of the TAČR project TH02030421 ULTRA, a fully functional ultrasonic device for the rehabilitation of pump and seepage wells was developed. This rehabilitation rig is self-contained, independent of support from other machinery and transport equipment, and can be operated even without an available electrical connection.

Kapitola V

Summary

HYDRODYNAMICKÉ ZKOUŠKY

Hydrodynamické zkoušky (tj. čerpací a stoupací) jsou prováděny za účelem stanovení hydraulických parametrů kolektoru podzemní vody (hydraulické vodivosti, transmisivity, storativity), ale také k určení parametrů vlastního čerpaného vrtu (koeficientu dodatečných odporů, tzv. skin faktoru a storativity vrtu). Theis v roce 1935 (Theis, 1935) na základě idealizovaných předpokladů publikoval řešení základní rovnice popisující neustálené radiálně symetrické proudění k ideálnímu vrtu pro kolektor s napjatou hladinou. C. V. Theis využil pro popis proudění podzemní vody porézním prostředím analogickou rovnicí, která popisuje prostup tepla pevným prostředím (I-28). Jeho řešení se využívá k určení transmisivity a storativity zvodně pro případ vrtu bez dodatečných odporů a se zanedbatelně malým poloměrem. Tato metoda je známa jako tzv. metoda Theisovy typové křivky. Na tuto práci navázali Cooper a Jacob (Cooper & Jacob, 1946), kteří zjednodušili Theisovu studňovou funkci, kdy pro vyšší časy čerpací zkoušky se v průběhu snížení vs. logaritmus času vytváří přímkový úsek a z Theisovy studňové funkce jsou zachovány pouze první dva členy (chyba ve výpočtech je pro argument Theisovy funkce menší než 0,01–0,25 %). Průběh čerpací zkoušky je u reálných vrtů významně ovlivňován dodatečnými odpory (vyjádřenými tzv. skin efektem). Jako první zavedli dodatečné odpory na vrtu a jeho nejbližším okolí do výpočtů na naftových vrtech van Everdingen (Van Everdingen, 1953) a Hurst (Hurst, 1953). Hawkins (Hawkins Jr., 1956) zavedl ve výpočtech dodatečné odpory formou zóny okolo vrtu se změněnou hydraulickou vodivostí K . V počáteční části čerpací (i stoupací) zkoušky má výrazný vliv na průběh snížení v čase vlastní objem vrtu (tzv. storativita vrtu), kterou se jako první v podzemní hydraulice zabývali Papadopulos a Cooper (Papadopulos & Cooper, 1967) a poté v naftové oblasti Ramey (Ramey, 1970). Základní řešení rovnice neustáleného radiálně symetrického proudění kapaliny k úplnému vrtu s uvažováním dodatečných odporů a vlivu vlastního objemu vrtu publikoval v roce 1970 Agarwal et al. (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970). Následně řada autorů odvodila různé postupy a metody, např. typových křivek, k určení dodatečných odporů a storativity vrtu z čerpací zkoušky. K řešení základní parciální diferenciální rovnice radiálně symetrického přítoku za neustáleného režimu k vrtu použil Laplaceovu transformaci jako jeden z prvních van Everdingen (Van Everdingen, 1953). K inverzi Laplaceovy transformace se jako nejvýhodnější jak v hydraulice podzemních vod, tak i v naftové oblasti (a to až do současnosti) velmi často používá Stehfestův algoritmus 368 (Stehfest, 1970).

DODATEČNÉ ODPORY

Regenerační zásah na vrtu v podstatě znamená snížení velikosti dodatečných odporů na odčerpávaném vrtu a jeho nejbližším 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. Dodatečné odpory způsobují, že většina vrtů s časem ztrácí svou specifickou kapacitu. To je způsobeno především stárnutím vrtů, a to mechanickými, chemickými a biologickými procesy. Mechanická degradace je nejčastěji způsobena usazováním drobných částic v blízkém okolí

samotného vrtu. 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 ztuhnutí porézního prostředí v blízkosti vrtu a tím ke snížení propustnosti. Dalšími příčinami mohou být 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 efektivity vrtu a lze na základě jejich stanovení sledovat proces stárnutí vrtu. Chemická degradace je nejčastěji pozorována v oblastech, kde proudící voda má vyšší množství rozpuštěných minerálních látek. Tento typ degradace je způsoben ukládáním minerálních látek na jednotlivých částech studny. Nejčastějšími látkami jsou uhličitán vápenatý, uhličitán hořečnatý, síran vápenatý, mangan a železo. Biologickou degradaci způsobují bakterie, které se ve většině zvodnělých vrstev vyskytují zcela přirozeně. Tyto bakterie mohou být rozděleny do třech základních skupin. První a také nejvíce rozšířenou skupinou jsou železité bakterie. Tyto bakterie způsobují oxidaci sloučenin železa a produkují hydroxid železitý. Jedná se o organickou látku zbarvenou do červena. Tato látka má slizovitý charakter a ukládá se na stěnách vrtu, jednotlivých částech čerpadla a v přilehlém okolí studny. Pokud je tato látka vystavena vzduchu, ztuhne, a tím může způsobit daleko větší škody. Druhou skupinou jsou bakterie redukující sloučeniny síry. Tyto bakterie se mohou vyskytovat i v extrémně kyselých vodách, a to až s pH rovné 1. Produktem těchto bakterií je kyselina sírová a plynný sirovodík. Přítomnost těchto bakterií může být indikována silným zápachem. Poslední skupinou jsou bakterie produkující sliz, které koexistují s výše zmíněnými typy bakterií. Vytvořený sliz nejčastěji zasahuje části čerpadla, ale může také ucpávat filtrační obsyp studny nebo póry ve zvodnělé vrstvě v okolí vrtu. Všechny zmíněné způsoby degradace studny mají za následek změnu hydraulické vodivosti na jednotlivých částech studně a v přilehlé zvodnělé vrstvě. Souhrn všech těchto faktorů je nazýván „skin effect“. Části dodatečných odporů jsou způsobeny např. kolmatací vrtu, tj. ucpáváním pórů např. jemným materiálem, čímž dochází ke snížení průtočnosti porézního prostředí; zachycováním částic horniny nebo obsypu v otvorech filtru, kam přiřazujeme také chemickou inkrustaci a ucpávání otvorů filtru působením mikroorganismů a bakterií, neúplným otevřením mocnosti zvodnělé vrstvy vrtem (tzv. neúplné vrtu). Každá část dodatečných odporů způsobuje přírůstek snížení hladiny vody ve vrtu.

STORATIVITA VRTU

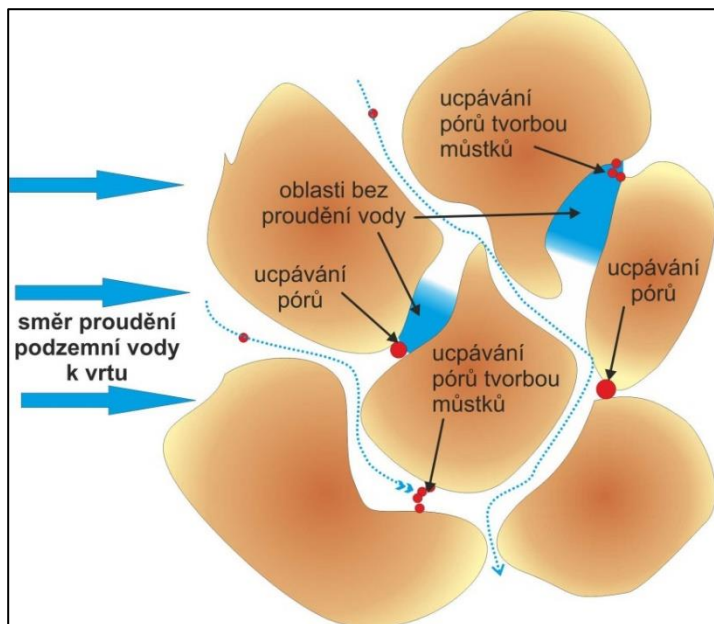
Storativita vrtu výrazně ovlivňuje počáteční průběh čerpací zkoušky, viz obr. 6, a to v rádech sekund od zahájení čerpací zkoušky. To je způsobeno tím, že na začátku čerpací zkoušky je čerpána voda z vlastního objemu vrtu. S narůstajícím časem průběhu čerpací zkoušky narůstá přítok z okolní zvodně, a to až na hodnotu rovnou čerpanému

množství. Naopak množství vody odčerpávané z vlastního objemu vrtu se s časem snižuje a po čase dosáhne zanedbatelné hodnoty. Míra ovlivnění počátečního průběhu čerpací zkoušky závisí na poloměru čerpaného vrtu. Touto problematikou se zabýval Ramey (Ramey H. J., 1970) a definoval takzvaný jednotkový faktor storativity vrtu, kde tj je čas zvoleného bodu na počátku ČZ, kdy se čerpá voda jen z vlastního objemu vrtu. Jednotkový faktor C Ramey určuje z počáteční části několika sekund od začátku čerpání (Pech P. , 2003).

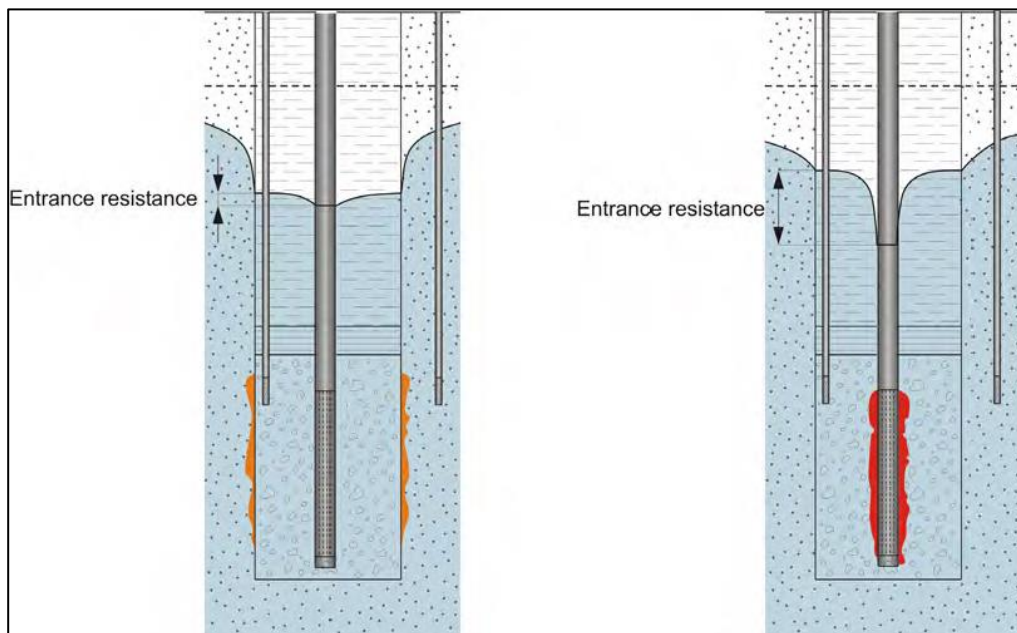
KOLMATACE VRTŮ

Tento proces začíná bezprostředně po uvedení jímacích vrtů do provozu (resp. už při jejich konstrukci), ačkoliv vliv na snížení hladiny (a tím i provozní vydatnost) se projeví až po určité době. Ke kolmataci vrtů dochází vlivem mechanické intruze pohyblivých sedimentárních částic, akumulací minerálních nárůstů vzniklých vlivem oxidačně-redukčních procesů a rovněž vlivem metabolické činnosti chemolitotrofních mikroorganismů. Štěrkový filtrační obsyp vrtu představuje jistou formu hydraulické bariéry pro přitékající vodu. Snižování úrovně hladiny ve vrtech indukuje výrazný gradient napříč krátkého prostoru poloměru vrtu, což z hlediska kolmatace vede k ustavení 2 kritických rozhraní:

- 1) Hornina vs. obsyp vrtu: Nachází se zde hranice původního porézního prostředí a konstrukce vrtu s výrazně vyšší pórovitostí a vlivem objemu vody ve vrtu. Rozhraní představuje oblast s nejvyšší (skutečnou) rychlostí proudění vody, a tedy i oblast potenciálního turbulentního proudění. Tato zóna je riziková z hlediska mechanické kolmatace vlivem zvýšené migrace pohyblivých sedimentárních částic.
- 2) Obsyp vs. perforovaná výstroj vrtu: Nachází se na hranici vlivu oxidace zpravidla původně redukčního prostředí (vzdušným O₂, popř. oxidace prostřednictvím vodivého materiálu výstroje vrtu). Vliv v této zóně je zejména chemicko-biologické (oxidačně-redukční) povahy a je zde tedy riziko vzniku chemicko-biologické kolmatace (pozn.: Tato v principu vzniká na kontaktu různě oxidovaných přítoků podzemní vody – důvodem může být i přirozená stratigrafie podzemní vody, nejen konstrukce a využívání jímacích vrtů).



Obrázek 6. Schematizovaný mechanismus kolmatace obsypu vrtu (archiv autora)



Obrázek 7. Srovnání vzniku a hydraulických projevů mechanické a chemicko-biologické kolmatace (De Zwart, 2007)

PŘÍČINY KOLMATACE VRTŮ

- Na kolmataci vrtaných studní se podílí celá řada procesů a její příčiny tedy spočívají v lokálně odlišných geofyzikálních, hydrochemických, biologických a geologických podmínkách, které se navíc potkávají s technickými specifiky vlastní konstrukce vrtů i způsoby jejich provozování. Z hlediska přírodních podmínek v bezprostředním okolí představuje už samotná realizace vrtané studny (a v důsledku její využívání) narušení původní rovnováhy (Patzner, 2007) ve smyslu: Výrazné zvýšení rychlosti proudění podzemní vody
- Snížení tlaku podzemní vody (zejména v případě napjaté hladiny)
- Vznik lokálního turbulentního proudění
- Zvýšení RedOx potenciálu (tj. ve prospěch oxidace)

Při konstrukci vrtané studny rovněž často dochází k propojení více vodonosných vrstev (tj. preferenčních cest v rámci shodného kolektoru podzemní vody nebo přímo více kolektorů), kdy dochází ke kontaktu tlakově odlišných přítoků a následně změnám ve směru proudění. Dále dochází k mísení podzemních vod s odlišným chemismem (a zejména odlišnou oxidací), což vede ke komplexním oxidačně-redukčním procesům, které mohou dále být umocněny použitím elektricky vodivých a korozivních materiálů pro konstrukci vrtaných studní (např. ocelové výstroje). Snižováním úrovně hladiny podzemní vody při čerpání dochází k podtlaku, který dále posiluje příliv vzdušného O₂ do oblasti, která by přirozeně představovala spíše redukční prostředí. Soubor těchto vlivů představuje komplexní předpoklad pro vznik kolmatace vrtů.

Lze odlišit následující mechanismy kolmatací s odhadem jejich průměrné četnosti (Niehues, 1999):

- pískování (14%)
- minerální inkrustace (68%)
- spékání (sinterizace) (3%)
- zašlemování (1%)
- koroze (5%)
- nepopsané důvody (9%)

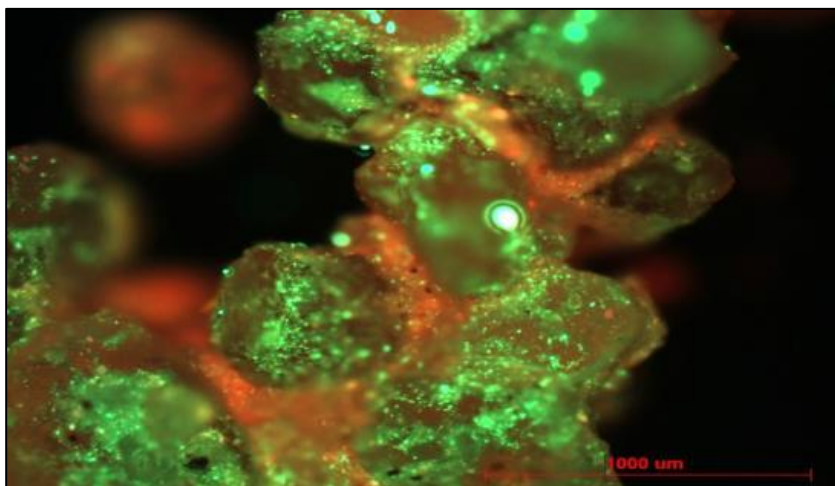
V praxi nepochybně dochází ke kombinaci a synergii jednotlivých mechanismů, jejichž intenzita je zároveň nejvyšší v oblastech relativně nejvyššího přítoku do vrtu – tyto se tedy zpravidla uzavírají nejdříve.

Pískování

Vlivem transportu jemných sedimentárních částic dochází k postupnému zanášení a ucpávání jednotlivých pórů na přítoku do vrtu. Příčinou takového zanášení jsou obvykle chyby v konstrukci vrtu nebo jeho nadměrné čerpání. Jedná se v zásadě o princip mechanické kolmatace s několika scénáři vlastního průběhu (De Zwart, 2007).

Minerální inkrustace

Jedná se o výsledek oxidačních procesů, kdy původní rozpustné formy v podzemní vodě přítomných iontů (typicky Fe^{2+} a Mn^{2+}) se vysráží v minerální podobě a nerozpustné formě (typicky Fe^{3+} a Mn^{4+}). Proces přeměny probíhá ve více formách, a to chemickou oxidací, nebo v průběhu metabolických procesů chemolitotrofních mikroorganismů. Chemolitotrofní mikroorganismy jsou součástí přirozené flóry podzemních vod. Změny RedOx potenciálu v oblasti konstrukce a provozu studny vedou k enormnímu nárůstu těchto mikroorganismů, a tím i ke zvýšené tvorbě metabolických produktů v podobě sraženin Fe a Mn. Konzistence usazenin železa nebo manganu je zpočátku měkká až slizká. V delším časovém měřítku tyto látky ztvrdnou v důsledku postupné dehydratace. Studny, které nebyly po desetiletí udržovány, proto vykazují uvnitř perforace výstrojí jasně viditelné nánosy tvrdé minerální inkrusty rezavě červené barvy. Ke stejnému procesu dochází rovněž ve filtračním obsypu vrtu, zřejmě ovšem později a nižší rychlostí.



Obrázek 8. Mikroskopický detail minerální inkrustace Fe^{3+} v porézním prostředí (projekt TH02030421 ULTRA)

Sinterizace (spékání)

Lokální uvolnění tlaku kolektoru snížením úrovně hladiny podzemní vody může vést v důsledku k poklesu koncentrace CO_2 ve vodě, což dále vede k přeměně $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ a tedy k vysrážení uhličitanu vápenatého z roztoků obsahujících rozpuštěný vápenec (proces vzniku krápníků..ap.).

Zašlemování

V ojedinělých případech dochází k tvorbě biomasy v důsledku bakteriální činnosti při přítomnosti organických látek.

Koroze

V závislosti na chemickém složení vody může docházet ke korozi kovových částí konstrukce vrtu (tj. výstroje, pažení, čerpací kolony). Principem koroze jsou zpravidla oxidačně-redukční procesy v prostoru vrtu, které jsou podpořeny vodivostí materiálu pro elektrický proud (tj. vzniká prakticky elektrický článok s nízkým napětím, kde v anodické části dochází k úbytku materiálu a v katodické k jeho opětovnému vysrážení). Koroze vede k nevratnému oslabení postiženého materiálu a nelze jej tedy regenerací napravit. Korozi se lze vyhnout pouze použitím nekorozivních materiálů (nerezová ocel, plasty, kamenina...apod.)

DEPOZICE KOLMATOVANÉHO MATERIÁLU

Sedimenty způsobené kolmatací lze pozorovat v různých částech konstrukce vrtu. I přes vzájemně podobné chemické složení těchto ložisek má jejich pozice vliv na časový průběh a možnosti identifikace i případné regenerace.

Výstroj vrtu a perforační otvory

Tento prostor je (po odstranění čerpací techniky a vybavení vrtu) nejlépe přístupný pro inspekci. Aplikace regeneračních postupů je velmi efektivní zejména z důvodu dobré mechanické přístupnosti. V závislosti na technický stav vlastní výstroje vrtu je možné i odstranění tvrdých minerálních nárůstů.

Kalník vrtu

Jedná se o nejnižší prostor výstroje vrtu, který primárně slouží pro depozici usazenin v podzemní vodě přítomných. V tomto prostoru prakticky nedochází k proudění vody, a tedy ani ke vzniku kolmatace, ale veškeré volné sedimenty (stejně jako spadlé předměty) končí právě zde a čištění tohoto prostoru je tedy základem postupu regeneračních prací. V případě výrazné mocnosti přítomných sedimentů může dojít až k uzavření nižších partií perforačních otvorů výstroje.

Čerpací kolona

Usazeniny v této oblasti lze snadno mechanicky odstranit při demontáži čerpadla.



Obrázek 9. Kolmatující usazeniny v čerpací koloně (Severočeské vodovody a kanalizace, a.s.)

Porézní prostor štěrkového obsypu

Jedná se o hlavní předmět zájmu diagnostických a regeneračních prací, protože kolmatace pórových prostor obsypu vrtu se hlavní měrou podílí na snížení přítoků vody do vrtu a zvýšení dodatečných odporů na vrtu. V této zóně nejsou kolmataci vzniklé usazeniny vizuálně identifikovatelné a lze je zjistit pouze pomocí geofyzikálních metod – tj. buď přímým stanovením přítomnosti sedimentárního materiálu (zpravidla měření hustoty metodami Neutron-neutron, Gama, Kavernometrie...apod.), nebo nepřímým měřením distribuce přítoků vody do vrtu (Rezistivimetrie). Tato skutečnost limituje detekci vývoje kolmatace ve smyslu stanovení rozsahu, typu a průběhu za účelem vhodného načasování regenerace vrtů. Dostupnost tohoto prostoru pro regenerační techniky souvisí s aktuální konzistencí kolmatujících usazenin.

Kolmatace sousedícího horninového prostředí

Kolmatující usazeniny se ukládají i v sousedícím horninovém prostředí, ačkoliv dosah takto vzniklé tzv. „kolmatační zóny“ není příliš prozkoumán (dle (De Zwart, 2007) zasahuje poze do vzdálenosti $<0,2\text{m}$ od okraje obsypu vrtu. Usazeniny z tohoto prostoru jsou prakticky neodstranitelné.

REGENERACE VRTŮ

Jedná se o soubor technologií a mechanických postupů, které jsou zpravidla aplikovatelné v případě poklesu produkční kapacity jímacích vrtů (studní). Cílem regenerací je zvýšení (ve smyslu obnovy původních hodnot) přítoku vody do vrtů, jejich význam je tedy ve zvýšení propustnosti perforovaných úseků výstroje vrtu, filtračního obsypu a do určité míry rovněž nejbližší části porézního prostředí. Ve

smyslu hydrauliky podzemní vody znamená se jedná o snížení dodatečných odporů (skin efektu) ve smyslu koeficientu dodatečných odporů W [-]. Regenerace v principu nemají vliv na stacionární úroveň hladiny podzemní vody v daném objektu s výjimkou situací, kdy vlivem regeneračního zásahu dojde k otevření (resp. k propojení) více přítoků s rozdílnou hodnotou hydrostatického tlaku, což může vést ke změnám piezometrického tlaku v zájmovém objektu.

Regenerace vrtů reagují na proces kolmatace vrtů (tj. „well ageing“), který je charakterizován snížením propustnosti porézního materiálu v okolí jímacího vrtu (tj. uzavřením pórů na přítoku).

Techniky regenerace jímacích vrtů

Ve výzkumné i provozní praxi je používáno celé spektrum metod regenerací jímacích vrtů, jejichž nasazení obvykle začíná jednoduchými technikami hrubého čištění výstroje vrtu. Vlastní metody jsou často kombinovány za účelem intenzifikace účinku. Principiální rozdělení metod je na „mechanické“ a „chemické.“ Nevýhodou většiny mechanických metod je malá hloubka dosahu účinku, kterou lze v praxi opakovaně stanovovat (např. geofyzikálním nebo hydraulickým průzkumem). Vnitřní stěny výstroje vrtu mohou být uspokojivě vyčištěny téměř všemi dostupnými metodami, ale ve vnější oblasti štěrkového obsypu a na rozhraní horninového prostředí je účinek většiny mechanických metod značně omezen. Hlavní příčinou je silné zpomalení kinetické energie v důsledku třecích ztrát na filtračních štěrbinách a zrnech štěrku (Houben & Treskatis, 2007).

Odčerpávání sedimentu air-liftem a čištění stěn kartáčováním

Jedná se o techniky čištění vrtů, nikoliv přímo regenerační, ale jako takové tvoří základ všech prací, jejichž sled je vždy tímto způsobem zahájen a často i vícenásobně opakován. Jedná se o základní techniky čištění měkkých usazenin uvnitř výstroje vrtané studny a odstranění sedimentů na dně vrtu, kdy účinek je omezen na vnitřní prostor výstroje vrtu a perforační otvory. Používané kartáče jsou obvykle plastové či ocelové s mírně větším průměrem oproti výstroji vrtu.

Mechanická regenerace

K rozvoji metod mechanické (tj. hydraulické) regenerace došlo za účelem jejich intenzifikace a zároveň vzniku alternativy k metodám regenerace chemické, která (kromě vysoké účinnosti) znamená zavádění množství cizorodých látek do podzemních vod a horninového prostředí (Patzner, 2007).

Metody vysokého tlaku

Jedná se o aplikaci vysokotlakého vodního paprsku (280-500bar) se stabilní či rotační tryskou uvnitř jímacích vrtů za účelem využití kinetické energie k rozbití formací kolmatujících sedimentů (tj. vysokotlaký čistič). Účinek metody na filtrační obsyp vrtu je poněkud sporný. Metoda je vysoce efektivní pro vnitřní prostor výstroje vrtu, kde

jejím prostřednictvím lze odstranit i tvrdé minerální nárůsty uvnitř výstroje vrtu a perforačních otvorů. V hlubších vrstvách filtračního obsypu dochází ovšem k rychlým ztrátám kinetické energie vzhledem k odporu vody (vlastní operace obvykle probíhá pod vodou) a po opakovaném rozbití koncentrovaného vodního paprsku průchodem šterkového obsypu. Účinek ve šterkovém obsypu je tedy zřejmě převážně hydraulický - tj. vymývání zvýšením průtoku v dané sekci. Vysoká rychlost rotace trysek způsobuje vibraci v okolí operačního prostoru, která se podílí na procesu regenerace. Rotace je zároveň důležitá pro bezpečnost materiálu výstroje vrtu, protože v případě jejího zastavení hrozí bodové porušení materiálu výstroje vrtu (zejména v případě překližky, PVC, PE nebo kameniny). Počet otáček se pohybuje v rozmezí 10-10.000 r/min. Méně obvyklým konceptem aplikace metody vysokého tlaku je tzv. vnější proplachování, které se provádí pomocí vpichované sondy přímo v obsypu vrtu, tj. bez omezení způsobeném průchodem vodního paprsku přes perforovanou část výstroje. Účinnost této metody ovšem není známa.

Intenzivní čerpání

Zvýšení rychlosti proudění vč. indukce turbulentního proudění (tj. mechanismy způsobující v delším časovém měřítku mechanickou kolmataci) lze krátkodobě využít jako regenerační techniky. Principem je intenzifikace čerpání uzavřením ponorného čerpadla shora i zdola těsněním (packerem) tak, aby byla bodově indukována pouze horizontální složka proudění a zvýšilo se tak násobně množství odčerpané vody z každé sekce oproti běžnému provozu. Princip má efektivitu pro volně sedimentované částice v prostoru šterkového obsypu, způsobuje rovněž nárůst rychlosti proudění podzemní vody v kolektoru, což naopak může aktivovat pohyblivou část sedimentů v této zóně, které naopak podpoří další mechanickou kolmataci vrtu. Metoda je tedy především vhodná pro „aktivaci“ nových vrtaných studní po jejich dokončení a sedimentů ze šterkového obsypu, které byly uvolněny jinými metodami.

Písty

Vertikální pohyb těsnících kotoučů (tj. diskových packerů) indukuje proudění v přilehlé části šterkového obsypu, díky čemuž dochází k přemístění volně usazených sedimentárních částic. Metoda není příliš účinná, ale neovlivňuje rychlost proudění podzemní vody v přilehlé části kolektoru.

Nízkotlaké promývání

Při nízkém tlaku, ale naopak vysokém průtoku vody lze dosáhnout efektu lokálního rozvolnění šterkového obsypu při průniku vody do dané oblasti.

Rázové (seismické) metody

Účinným prostředkem regenerací je rázování tlakovou vlnou, kterou lze generovat výbušninou, zápalem uvolněného H₂ po hydrolýze nebo rázovou expanzí vysoce stlačeného plynu (vzduchu nebo N₂ – tzv. Hydro-pulse). Těmito způsoby dochází

k uvolnění seismické vlny, která zapříčiní dočasný pohyb frakce štěrkového obsypu společně s promytím prostoru tlakovou vlnou. Výsledkem jsou náhlé změny v objemu filtračního materiálu, které mohou vést k enormnímu nárůstu přítoku podzemní vody, ale naopak mohou představovat riziko pro vlastní konstrukci vrtu zejména u starších objektů s porušenou integritou výstroje vrtu.

Chemické regenerace

Jedná se o techniky využívající aplikaci chemických činidel za účelem zásahu do oxidačně-redukčních procesů, které jsou příčinou největší části kolmatací.

Používané skupiny činidel jsou:

- redukční činidla: Kyseliny minerální (HCl) nebo organické (citronová, octová, glykolová) v roztoku dočasně obnoví redukční prostředí, ve kterém dochází k rozpuštění minerálních nárůstů (coby produktů oxidačních procesů). Dochází částečně k rozpadu struktur formací usazenin a změnám mocenství do vodorozpustných forem iontů (zejména Fe a Mn), které je možné s vodou odčerpát.
- oxidační činidla: (H₂O₂, KMnO₄, NaClO) Jsou používána k urychlení probíhajících oxidačních procesů spojených s rozpadem struktur a vlivem zejména na organické látky (rozpad až na CO₂)

Vhodné činidlo a aplikovanou dávku je nezbytné zvolit na základě předchozí analýzy chemické povahy kolmatujících sedimentů a rovněž celkového chemismu podzemní vody, horninového prostředí a předpokládaných dopadů provozních i environmentálních. Po zvolené době expozice je nutné odčerpání vzniklého objemu odpadní vody (obvykle 10-20ti násobku použitého objemu činidla) a zamezení přítomnosti reziduí. Odčerpaná voda obvykle stále obsahuje množství aplikovaného činidla a reakčních produktů, musí tedy být neutralizována a příslušně zlikvidována. Čerpání musí trvat do doby ustavení původních hodnot pH. Každá chemická regenerace je potenciálně environmentálně riziková.

Termické metody

V literatuře (Mansuy, 1999) je popsána metoda expanze CO₂, která spočívá v injektáži plynného CO₂ do prostoru vrtu nebo selektivně po částech do štěrkového obsypu za účelem vytěsnění vody ze zájmového porézního prostoru. Následuje aplikace kapalného CO₂. (t~ -40 °C), který kromě teplotního šoku působí zvětšování porézního prostoru expanzí CO₂ při jeho postupném odpařování. Tento proces by měl vést k otřesům a turbulencím, konkrétní aplikace ani účinnost ovšem nejsou v literatuře popsány.

Akustické metody

Výzkum účinku ultrazvukové vlny na snížení dodatečných odporů na plášti jímacího vrtu (tj. regenerační účinek) byl předmětem řešeného projektu TH02030421 ULTRA, proto je tomuto principu věnován větší prostor i v tomto textu.

V literatuře je popsán experiment s akustickou metodou ve „slyšitelném“ spektru (Patzner, 2007), kdy se ovšem jednalo spíše o vibraci rezonujícího předmětu generovanou hydraulickým motorem připojené vrtné soupravy. Princip se v praxi regenerací vrtů neujal, ale naopak je v současnosti využíván u takzvaného zvukového vrtání „sonic drilling.“

Pokusy s využitím ultrazvuku pro regeneraci vrtaných studní se datují cca od roku 1980, úspěšné konstrukce zařízení od r. 1995 a výzkumný podklad byl realizován teprve v roce 2003 uvedením do provozu laboratorního fyzikálního modelu URSEL (Bott, Wiacek, & Wilken, 2003). Jedná se o mechanickou metodu s účinností v mikro až nano měřítku a bez namáhání konstrukčních prvků jímacích vrtů.

Tabulka 1. Dělení používaných metod regenerace jímacích vrtů (Patzner, 2007)

metody:	chemické	hydro-mechanické				termické
		vysokotlaké procesy	nízkotlaké procesy (intenzivní čerpání, písty)	vysokotlaké pulsy	ultrazvuk	expanze CO ₂
princíp:	aplikace koncentrovaných redukčních (kyselin) či oxidačních (H ₂ O ₂ , KMnO ₃ , NaClO ₄) činidel	pomocí vysokotlakých trysek vyvolán mechanický účinek tryskání	v oblasti obsypu generovány vysoké rychlosti proudění	V důsledku explozivního nárůstu objemu (výbušniny, stlačeného plynu...ap.) vzniká sesmická vlna s mechanickým účinkem.	emise ultrazvukových pulsů zevnitř výstroje vrtu	kapalný CO ₂ o teplotě cca -40°C je vypouštěn do štěrkové komory.
účinek:	ruzpustění a následné odčerpání nárůstů a sraženin	mechanické odstraňování nárůstů a sraženin	mechanický účinek proudění vody	mechanický tlakový účinek	oděr tvrdých inkrust, zkapalnění makromolekul, rozpad povlaků v	rozpad povlaků v důsledku objemových změn
omezení účinnosti:	nelze použít v situacích nepřípustné změny chemizmu vody	účinek pouze na okraji obsypu vrtu	účinek pouze v perforaci výstroje vrtu	omezený účinek na jemný filtrační materiál	bez omezení	omezený účinek na jemný filtrační materiál
riziko:	vznik velkého objemu odpadní	riziko poškození integrity výstroje	možná aktivace sedimentů z	možná aktivace sedimentů z	bez nebezpečí	poškození materiálů, ohrožení
rozsah účinku:	výstroj a obsyp vrtu	výstroj vrtu	výstroj vrtu	výstroj a obsyp vrtu	výstroj a obsyp vrtu	výstroj a obsyp vrtu

Ultrazvuk

Ultrazvuk je mechanické vlnění vyvolané vzájemným rozkmitáním elastických částic s frekvencí vyšší než 20 kHz, tedy mimo rozsah lidského sluchu. V závislosti na frekvenci se ultrazvukové vlnění dělí na tři kategorie, silový ultrazvuk s frekvencí 20–

100 kHz, vysokofrekvenční s frekvencí od 100 kHz do 1 MHz a diagnostický ultrazvuk o frekvencích 1–500 MHz. S vyšší hustotou prostředí (tj. bližší vzdáleností částic) stoupá rychlost šíření vlny. Nejpomaleji se tedy bude vlnění šířit v plynech, rychleji v kapalinách a pevných látkách. Zdrojem uměle vytvářeného ultrazvuku je ultrazvukový generátor. Pro ultrazvuky o malé intenzitě to jsou píšťaly, ladičky a sirény, ty jsou schopny vytvořit jen frekvenci <200 kHz. Pro vyšší frekvence jsou využívány elektromechanické (piezoelektrické) nebo magnetostrikční generátory (měniče). Magnetostrikční měnič pracuje na principu změny rozměru feromagnetického materiálu při vložení do střídavého magnetického pole. Rychlost šíření ultrazvukového vlnění je závislá na pružnosti a hustotě prostředí, kterým prochází (Jüttnerová & Bryjová, 2016) (pro vodu je rychlost šíření ultrazvukového vlnění 1480 m/s).

Ultrazvukové kmity lze vytvořit třemi typy generátorů:

1. mechanickými (malé ladičky, píšťaly; malá frekvence a výkon),
2. magnetostrikčními (kmity kolem železné tyčinky v magnetickém poli elektromagnetu, který je napájen střídavým proudem: velký výkon, ale frekvence jen do 100 kHz; použití v zubním lékařství a chirurgii),
3. piezoelektrickými (křemíková destička je připojena k elektrodám se střídavým napětím, tedy kmitá se stejnou frekvencí jako napětí a mění energii elektrickou na mechanickou, která rozkmitá okolní prostředí; použití pro diagnostické i terapeutické účely).

- Vysoká frekvence způsobuje velmi krátkou vlnovou délku ultrazvukových vln, ve kterých ale dochází při vyšších intenzitách k tlakovým změnám v řádech MPa

- Tepelné účinky – energie vlny je přímo úměrná druhé mocnině frekvence. Značná absorpce je na rozhraní tkání s různou akustickou impedancí (měkká tkáň X kost = periostální bolest).

- Mechanické – průchod ultrazvukové vlny prostředím má za následek lokální tlakové změny (MPa/mm). Mechanické vlnění a tedy i zvuk se šíří ve všech skupenstvích látky pomocí vazeb mezi částicemi. Dochází k přenosu energie kmitavého pohybu na sousední částice a tím k šíření kmity. Prostor se nazývá pružným.

- Fyzikálně-chemické – ultrazvuk má účinky disperzní, což znamená, že s jeho pomocí lze připravit jemné suspenze, emulze, pěny apod., a také koagulační – slouží např. k čištění plynů.

- Biologické – do intenzity 3 W/cm² mají ultrazvuky spíše biopozitivní účinky: zrychlení metabolické výměny apod., nad 3 W/cm² mají za následek ireverzibilní morfologické změny – rozbití buněčného jádra, tepelná koagulace bílkovin.

Při použití ultrazvukové vlny pro regeneraci jímacích vrtů je jedním z limitujících faktorů hloubka průniku vlny napříč prostředím, což závisí na frekvenci ultrazvukové vlny a platí zde nepřímá úměrnost. Pro pažnici a šterkový obsyp se v praxi jedná o 25–35 cm, což odpovídá vzdálenosti, na které klesne v daném prostředí vlnová amplituda na polovinu původní hodnoty. Kinetická energie je v principu méně pohlcována v kapalinách a pevných látkách. Účinek ultrazvuku je mechanický a termický na anorganické i organické materiály. Šířením ultrazvuku prostředím dochází k rozkmitání jeho molekul a tím k rychlým změnám tlaku. Při průchodu ultrazvuku tkáněmi se velká část energie přeměňuje na mechanickou, dochází k vibracím tkání,

což vede ke změně vlastností buněčných membrán (fyzikálně-chemický účinek), štěpení vysokomolekulárních látek (chemický účinek) a absorpci mechanické energie (biologický účinek). Při regeneraci jímacích vrtů ultrazvukovou technologií jsou využívány zejména 4 hlavní účinky:

- 1) Odstranění tvrdých inkrust vlivem rozdílů v deformaci zrn obsypu a pokryvu. Příčinou je rozdílná mechanická deformace na rozhraní materiálů
- 2) Ztekucení organických molekul mechanickým namáháním. Ultrazvukem jsou roztrhány velké organické molekuly na menší. Je potvrzen určitý stupeň letality pro viry a bakterie (obr. 2)
- 3) „Obroušení“ inkrustů mezi zrny obsypu. Energie ultrazvuku zapříčiňuje pohyb na molekulární úrovni, což vede k obroušení povrchu materiálů
- 4) Kavitace. Proud ultrazvuku vyvíjí skrz podtlak rozrušení kolmatace

TERÉNNÍ APLIKACE ULTRAZVUKOVÉ METODY

Experimentální poloprovozní nasazení bylo provedeno v rámci výzkumného projektu TH02030421 ULTRA a k prvnímu nasazení nově vyvíjené sestavy došlo v roce 2021 celkem na 3 vodárenských jímacích vrtech: Všetaty HV-5, Vlastislav MO-4 a Lišany R-3.

Objekt HV-5 pochází z roku 1977 a v současné době je držen jako záložní vodárenský jímací zdroj subjektu Středočeské vodárny, a.s., v rámci jímacího území Všetaty. V období cca 1980–2000 byl vrt intenzivně využíván provozní vydatností <10 l/s. Jedná se o jímací vrtanou studnu vrtného průměru d450mm s ocelovou výstrojí DN377 mm s úsekem vrtané perforace 4,2–11,0 m p.t. Vrt jímá vodu z mělkého kolektoru stáří kvartéru, úroveň hladiny podzemní vody (HPV) se pohybuje cca kolem 1 m p.t. V rámci předchozího provozu vrt nebyl nikdy regenerován, hydrodynamické zkoušky byly provedeny pouze v době zprovoznění vrtu v roce 1977 (kdy byl vrt testován na $Q=20,61$ l/s).

Objekt Vlastislav MO-4 byl zhotoven v roce 1967 do konečné hloubky 36 m. Vrtaný průměr je 530 mm, průměr ocelového pláště 325 mm. Otevřený úsek výstroje vrtu sestává z vrtané perforace a obsyp vrtu je vytvořen z granulovaného filtračního obsypu frakce 8/15 mm. Vrt jímá vodu ze zvodně s volnou hladinou, počáteční čerpací kapacita (po dokončení vrtu) byla odhadována cca 5 l/s. Vrt je vodárensky provozován a je součástí jímacího území společnosti Severočeské vodovody a kanalizace, a.s.-

Jímací vrt R-3 byl zhotoven v r.1982 společností VODNÍ ZDROJE, n.p. vrtným průměrem d495mm do konečné hloubky 82 m p.t. Výstroj vrtu je ocelová průměru d273mm s úsekem kruhové vrtané perforace 29,86-71,89m p.t., objekt je umístěn v podzemní šachtě. Vrt je vodárensky provozován a je součástí jímacího území společnosti RAVOS Rakovník, a.s.

Regenerační práce byly zahájeny standardní technikou mechanického čištění – tj. očištěním stěn vrtu ocelovým kartáčem a odčerpáním sedimentu hydro-pneumatickým (mamutovým) čerpadlem za účelem zprůchodnění vnitřního prostoru výstroje vrtu a odtěžení napadávký v kalníku vč. odstranění cizích předmětů ze dna. Následně byly aplikována technologie ultrazvuku s cílem otevření maximálního množství perforačních otvorů, které jsou v současnosti vlivem pokročilé kolmatace vrtu

zaneseny, a rovněž zprůchodnění obsypu vrtu v prostoru za pláštěm výstroje. Vrt byl vystaven působení ultrazvukové vlny s celkovým výkonem 7,5 kW po průměrnou dobu 10 min/1 m perforovaného úseku výstroje při simultánním odčerpávání uvolněného sedimentu. Před zahájením a po regeneraci byla provedena TV kontrola technického stavu výstroje vrtu a ověřovací hydrodynamická zkouška ($t=30$ min). Úroveň hladiny podzemní vody byla měřena pomocí automatické tlakové sondy (v časovém intervalu 1 s) a s referenčním měřením pomocí ručního hladinoměru. Výsledky byly vyhodnoceny metodami hydrauliky podzemní vody: Orientačně byla stanovena hodnota specifické vydatnosti q [l/s/m] dle aktuální čerpané vydatnosti a (pseudo) ustálené úrovně hladiny podzemní vody. Vztahem, který vychází z řešení (Pech P. , 2003), byl stanoven koeficient dodatečných tlakových odporů jímacího vrtu $W(-)$ vč. souvisejících hydraulických charakteristik.

V rámci provedených experimentálních regenerací vrtů metodou ultrazvuku došlo k úspěšnému nasazení této technologie na všech testovaných lokalitách a zvýšení všech sledovaných parametrů. Vzhledem ke komplexní povaze hlavního posuzovaného parametru ($W[-]$ – koeficient dodatečných odporů, viz. (Agarwal, Al-Hussainy, & Ramey, 1970)) byla v jednom z případů (vrt Lišany R3) zaznamenána nejednoznačnost jeho interpretace pro vyhodnocení úspěšnosti regenerací, kdy kolmatace vrtu (jakkoliv prokázaná) se pouze minimálně projevila ve vývoji tohoto parametru. Důvod považuji za hydrogeologického rázu a může být předmětem detailního výzkumu zájmové lokality.

Tabulka 2: Srovnání hydraulických parametrů ovlivněných regenerací ultrazvukem

Všetaty HV5			
	PŘED regenerací	PO regeneraci	
$T[m^2/s]$	4.10E-02	5.22E-02	transmisivita zvodně
$q[l/s/m]$	18.71	21.14	specifická vydatnost
$Q[m^3/s]=$	0.01	0.01	čerpaná vydatnost
$1/lp=$	29.50	36.26	převrácená hodnota sklonu při prázdnění vrtu
$C[m^2]=$	0.19	0.30	koeficient
$C_D[-]=$	856.24	1338.30	bezrozměrná storativita vrtu
l	0.19	0.18	hydraulický gradient
$W[-]=$	4.15	3.46	koeficient dodatečných odporů
$h_w[m]=$	0.13	0.08	snížení způsobené dodatečnými odpory
Vlastislav MO4			
	PŘED regenerací	PO regeneraci	
$T[m^2/s]$	1.92E-03	1.92E-03	transmisivita zvodně
$q[l/s/m]$	0.71	0.93	specifická vydatnost
$Q[m^3/s]=$	0.001	0.001	čerpaná vydatnost
$1/lp=$	68.49	59.17	převrácená hodnota sklonu při prázdnění vrtu
$C[m^2]=$	0.10	0.08	koeficient
$C_D[-]=$	2102.53	1816.42	bezrozměrná storativita vrtu
l	0.99	0.98	hydraulický gradient
$W[-]=$	4.81	4.77	koeficient dodatečných odporů
$h_w[m]=$	0.65	0.36	snížení způsobené dodatečnými odpory
Lišany R3			
	PŘED regenerací	PO regeneraci	
$T[m^2/s]$	1.96E-03	3.67E-03	transmisivita zvodně
$q[l/s/m]$	9.72	15.85	specifická vydatnost
$Q[m^3/s]=$	0.006	0.007	čerpaná vydatnost
$1/lp=$	46.30	35.97	převrácená hodnota sklonu při prázdnění vrtu
$C[m^2]=$	0.29	0.24	koeficient
$C_D[-]=$	2961.70	2410.83	bezrozměrná storativita vrtu
l	0.08	0.06	hydraulický gradient
$W[-]=$	-4.61	-4.95	koeficient dodatečných odporů
$h_w[m]=$	-0.63	-1.41	snížení způsobené dodatečnými odpory

Literatura

- Aarts, A., Gijs, O., Bil, K., & Bot, E. (1999). Enhancement of Liquid Flow Through a Porous Medium by Ultrasonic Radiation. *SPE J.*, vol. 4, 321–327.
- Abramov, V., Abramova, A., Bayazitov, V., Altunina, L., Gerasin, A., Pashin, D., & Mason, T. (2015). Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. *Ultrason. Sonochem.*, vol. 25, 76–81.
- Abramov, V., Abramova, A., Bayazitov, V., Marnosov, A., Kuleshov, S., & Gerasin, A. (2016). Selective ultrasonic treatment of perforation zones in horizontal oil wells for water cut reduction. *Appl. Acoust.*, vol. 103, 214–220.
- Abramov, V., Mullakaev, M., Abramova, A., Esipov, I., & Mason, T. (2013). Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation. *Ultrason. Sonochem.*, vol. 20, 1289–1295.
- Abramova, A., Abramov, V., Bayazitov, V., & Nikonov, R. (2017). A method for water well regeneration based on shock waves and ultrasound. *Ultrason. Sonochem.*, vol. 36, 375–385.
- Abramowitz, M., & Stegun, I. (1972). *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables, 10th ed.*; p. 470. Washington, DC, USA: Government Printing.
- Adebayo, A., & Bageri, B. (2019). A simple NMR methodology for evaluating filter cake properties and drilling fluid-induced formation damage. *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, vol. 9.
- Agarwal, R. G., Al-Hussainy, R., & Ramey, H. (1. září 1970). An investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow. *Society of Petroleum Engineers Journal*, stránky 279-290.
- Al-Ajmi, N., Ahmadi, M., Ozkan, E., & Kazemi, H. (2008). Numerical Inversion of Laplace Transforms in the Solution of Transient Flow Problems With Discontinuities. *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, CO, USA: SPE.
- Bageri, B., Al-Mutairi, S., & Mahmoud, M. (2013). Different techniques for characterizing the filter cake. *Soc. Pet. Eng.*, vol. 1.
- Barua, G., & Bora, S. (2010). Hydraulics of a partially penetrating well with skin zone in a confined aquifer. *Adv. Water Resour.*, vol. 33, 1575–1587.
- Basak, P. (1979). Steady non-Darcian seepage through embankments closure. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE*, vol. 102, 435–443.

- Batu, V. (1998). *Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons.
- Bott, W., Wiacek, H., & Wilken, R.-D. (2003). *Brunnenregenerierung mittels hochenergetischem Ultraschall*. Wiesbaden: ESWE - Institut.
- Bott, W., Wiacek, H., & Wilken, R.-D. (2003). *Entwicklung eines Verfahrens zur Brunnen-Regenerierung mittels einer Ultraschall-Einheit*. Wiesbaden: ESWE - Institut für Wasserforschung und Wassertechnologie, GmbH.
- Bourdet, D. (2002). Well test analysis: The use of advanced interpretation models. *Handb. Pet. Explor. Prod.* , 1-426.
- Bourdet, D., Whittle, T., Douglas, A., & Pirard, Y. (1983). A new set of type curves simplifies well test analysis. *World Oil*, vol. 196, 95–106.
- Carslaw, H. (1921). *Introduction to the Mathematical Theory of the Conduction of Heat in Solids*; p. 286. London, UK: Macmillan and, Co.
- Chen, C., & Chang, C. (2006). Theoretical evaluation of non-uniform skin effect on aquifer response under constant rate pumping. *J. Hydrol.*, vol. 317, 190–201.
- Chen, C., & Lan, C. (2009). A simple data analysis method for a pumping test with skin and wellbore storage effect. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, nr. 20, 557-562.
- Chu, W.-C., García-Rivera, J., & Raghavan, R. (1. leden 1980). Analysis of Interference Test Data Influenced by Wellbore Storage and Skin at the Flowing Well. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 32, Issue 1, stránky 171-178.
- Cooper, H. H., & Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 27, nr. 4, 526-534.
- Daghooghi-Mobarakeh, H., Campbell, N., Bertrand, W., Kumar, P., Tiwari, S., Wang, L., Phelan, P. (2020). Ultrasound-assisted regeneration of zeolite/water adsorption pair. *Ultrason. Sonochem.*, vol. 64, 105042.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Dalmont.
- Dastkhan, Z., Zolalemin, A., Razminia, K., & Parvizi, H. (2015). Minimization and Removal of Well Storage Effect by Direct Deconvolution of Well Test Data. *SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition*. Abu Dhabi, United Arab Emirates: SPE.

- De Zwart, A. H. (2007). *Investigation of Clogging Processes in Unconsolidated Aquifers near Water Supply Wells*. Delft: Delft University of Technology.
- Earlougher, R. C. (1977). *Advances in Well Test Analysis: Monograph 5, nr. 264*. Tallas, IX: Society of Petroleum Engineers AIME.
- Earlougher, R. J. (1977). *Advances in well test analysis, vol. 5, nr. 264*. Monogr. Ser. Soc. Pet. Eng. AIME.
- Earlougher, R. J., & Kersch, K. (1974). Analysis of short-time transient test data by type-curve matching. *J. Pet. Technol.*, vol. 26, 793–800.
- Elkatatny, S., Jafarov, T., Al-Majed, A., & Mahmoud, M. (2019). Formation Damage Avoidance by Reducing Invasion with Sodium Silicate-Modified Water-Based Drilling Fluid. *Energies*, vol. 12, 485.
- Fan, Z., & Rarashar, R. (2020). Transient flow to a finite-radius well with well storage and skin effect in a poroelastic confined aquifer. *Adv. Water Resour.*, 142.
- Feng, F., Mal, A., Kabo, M., Wang, J., & Bar-Cohen, Y. (2005). The mechanical and thermal effects of focused ultrasound in a model biological material. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, 2347–2355.
- Ficaj, V., Pech, P., & Kahuda, D. (2021). Software for Evaluating Pumping Tests on Real Wells. *Appl. Sci.*, vol. 11, 3182.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Gringarten, A., Bourdet, D., Landel, P., & Kniazeff, V. (1979). A comparison between different skin and wellbore storage type-curves for early-time transient analysis. *Soc. Pet. Eng. SPE Ann. Technol. C Exh.*, 1-16.
- Gungor-Demirci, G., Lee, J., Keck, J., Harrison, S., & Bates, G. (2019). Development of a risk-based tool for groundwater well rehabilitation and replacement decisions. *J. Water Supply Res. Technol. AQUA*, vol. 68, 411–419.
- Hall, P., & Chen, J. (1996). *Water Well and Aquifer Test Analysis*; . Carlton, CO, USA: Water Resources Publication, LLC.; p. 409. ISBN 0-918334-93-4.
- Hamida, T., & Babadagli, T. (2007). Analysis of capillary interaction and oil recovery under ultrasonic waves. *Transp. Porous Media*, vol. 70, 231–255.
- Hawkins Jr., M. F. (1956). A note on the skin effect. *Transaction of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, nr. 8, 356-357.

- Hiscock, K., & Bense, V. (2014). *Hydrogeology Principles and Practice*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Blackwell: River St; p. 544. ISBN 978-0-470-65662-4.
- Holub, J. (2019). *Aplikační software pro vyhodnocení parametrů reálného vrtu z dat čerpací zkoušky*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Holub, J., Pech, P., Kuraz, M., Maca, P., & Kahuda, D. (2019). Evaluation of a pumping test with skin effect and wellbore storage on a confined aquifer in the Bela Crkva, Serbia. *Int. J. Water*, vol. 13, 1-11.
- Horne, R. N. (1990). *Modern well test analysis – A computer-aided approach*. Palo Alto, CA – US: Petroway, Inc.
- Hošek, J., Pokorný, P., Prach, J., Šída, P., & Křížek, M. (2018). Fossil thermokarst in South Bohemia (Czech Republic). *Geosci. Res. Rep.*, vol. 51, 131–139.
- Houben, G. (2003). Iron oxide incrustations in Wells—Part 1: Genesis, mineralogy and geochemistry. *Appl. Geochem.*, vol. 18, 927–939.
- Houben, G. J. (26. září 2015). Hydraulics of water wells — head losses. *Hydrogeological Journal, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015*, stránky 1659–1675.
- Houben, G., & Treskatis, C. (2007). *Water Well Rehabilitation and Reconstruction*. New York: McGraw Hill Professional.
- Houben, G., & Weihe, U. (2010). Spatial Distribution of Incrustations around a Water Well after 38 Years of Use. *Ground Water*, vol. 48, 53–58.
- Hubbert, M. K., & Henry, D. (1969). *The theory of ground-water motion and related papers*. New York: Haffner.
- Hurst, W. (1953). *Establishments of the skin effect and its impediment to fluid flow to a wellbore*. Dallas: Petroleum Engineering Institute.
- Iscan, A., Kok, M., & Bağcı, A. (2007). Permeability Reduction Due to Formation Damage by Drilling Fluids. *Energy Sources*, vol. 29, 851–859.
- Izadifar, Z., Babyn, P., & Chapman, D. (2017). Mechanical and Biological Effects of Ultrasound: A Review of Present Knowledge. *Ultrasound Med. Biol.* 43, 1085–1104.
- Jacob, C. (1947). Drawdown Test to Determine Effective Radius of Artesian Well. *Trans. Amer. Soc. of Civil. Engrs.*, Vol. 112, Paper 2321, 1047-1064.
- Jargon, J. (1976). Effect of wellbore storage and wellbore damage at the active well on interference test analysis. *J. Pet. Technol.*, vol. 28, 851–858.

- Jüttnerová, S., & Bryjová, J. (2016). *Interaktivní učebnice ultrasonografie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická Univerzita.
- Kabala, Z. (2001). Sensitivity analysis of a pumping test on a well with wellbore storage and skin. *Adv. Water Resour.*, vol. 24, 483–504.
- Kahuda, D., & Pech, P. (2020). A new method for evaluation of well rehabilitation from the early-portion of the pumping test. *Water*, vol. 12, 744.
- Kasenow, M. (2010). *Determination of Hydraulic conductivity from Grain Size Analysis*; p. 196. Carlton, CO, USA: Water Resources Publications LLC.; ISBN 978-1-887201-58-2.
- Kresic, N. (2007). *Hydrogeology and Groundwater Modeling, 2nd ed.* Taylor and Francis: Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Kruseman, G., & de Ridder, N. (2008). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd ed.* Wageningen, The Netherlands: IILRI.
- Kuchuk, F., & Kirwan, P. (1987). New skin and wellbore storage type curves for partially penetrated wells. *SPE Eval.*, vol. 2, 546–554.
- Kucuk, F., & Brigham, W. (1979). Transient flow in elliptical systems. *Soc. Pet. Eng. J.*, vol. 19, 401-410.
- Lee, J. (1982). *Well Testing*. New York: Society of Petroleum Engineers of AIME.
- Liu, P., Li, W., Xia, J., Jiao, Y., & Bie, A. (2016). Derivation and application of mathematical model for well test analysis with variable skin factor in hydrocarbon reservoirs. *AIP Adv.*, vol. 6.
- Mansuy, N. (1999). *Water well rehabilitation: A Practical Guide to Understand Well Problems and Solutions*. Regina: Layne Geosciences, Inc. LGI.
- Mansuy, N. (2017). *Water Well Rehabilitation*, p. 113–149. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Mashayekhizadeh, M., & Ghazanfari, M. (2011). The application of numerical Laplace inversion methods for type curve development in well testing: A comparative study. *Pet. Sci. Technol.*, vol. 29, 695–707.
- Mason, T., Collings, A., & Sumel, A. (2004). Sonic and ultrasonic removal of chemical contaminants from soil in the laboratory and on a large scale. *Ultrason. Sonochem.*, vol. 11, 205–211.
- Mathias, S., & Butler, A. (2007). Flow to a finite diameter well in a horizontally anisotropic aquifer with well storage. *Water Resour. Res.*, vol. 43, 1-6.

- McKinley, R. (1971). Wellbore transmissibility from afterflow-dominated pressure buildup data. *J. Pet. Technol.*, nr. 23, 863.
- Moench, A. (1985). Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers. *Water Resour. Res.*, 1121-1131.
- Moench, A. (1994). Specific yield as determined by type-curve analysis of aquifer-test data. *Ground Water*, 949-957.
- Mohsin, M., & Meribout, M. (2015). An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation. *Ultrason. Sonochem.*, vol. 23, 413-423.
- Mullakaev, M., Abramov, O., Abramov, V., Gradov, O., & Pechkov, A. (2009). An ultrasonic technology for productivity restoration in low-flow boreholes. *Chem. Pet. Eng.*, vol. 45, 203-210.
- Mullakaev, M., Abramov, V., & Abramova, A. (2015). Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 125, 201-208.
- Mullakaev, M., Abramov, V., & Abramova, A. (2017). Ultrasonic automated oil well complex and technology for enhancing marginal well productivity and heavy oil well recovery. *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 159, 1-7.
- Mullakaev, M., Abramov, V., & Abramova, A. (2017). Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity wells. *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 158, 529-534.
- Niehues, B. (1999). *DVGW-Umfrage Brunnenregenerierung, DVGW-FIGAWA-Intensivschulung*. Munchen: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- Novakowski, K. (1989). A Composite analytical model for analysis of pumping tests affected by well bore storage and finite thickness skin. *Water Resour. Res.*, nr. 25, 1937-1946.
- Novotny, R., & Pech, P. (2005). Analytical solutions for well drawdown with well losses: 2. Real well near boundary—solution by image well. *J. Environ. Hydrol.*, vol. 13.
- Papadopoulos, I., & Cooper, H. (1967). Drawdown in a well of large diameter. *Water Resources Research*, 241-244.
- Park, E., & Zhan, H. (2002). Hydraulics of a finite-diameter horizontal well with wellbore storage and skin effect. *Adv. Water Resour.*, vol. 25, 389-400.

- Pasandi, M., Samani, N., & Barry, D. (2008). Effect of wellbore and finite thickness skin on flow to a partially penetrating well in a phreatic aquifer 2008, 31, 383–398. *Adv. Water Resour.*, 383-398.
- Patel, M., & Singh, A. (2016). Near Wellbore Damage and Types of Skin Depending on Mechanism of Damage. *Proceedings of the Society of Petroleum Engineers SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*. Lafayette, LA, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE).
- Patzner, N. (2007). *System zur umweltfreundlichen Regenerierung von Wassergewinnungsbrunnen*. Bad Mergentheim: Sonic Umwelttechnik, GmbH.
- Patzner, N. (1. září 2009). *Sonic Umwelttechnik: SONIC Information No. EI-09.2009*. Načteno z Well Rehabilitation with High-Energetic Ultrasound: <http://www.sonic-umwelttechnik.de>
- Payne, F., Quinnan, J., & Potter, S. (2008). *Remediation Hydraulics*. London, UK: CRC Press; p. 432. ISBN 978-0849372490.
- Pech, P. (2003). Determination of the skin factor in the early portion of an aquifer test. *J. Environ. Hydrol.*, 1-9.
- Pech, P. (2004). Estimation of a well damage or stimulation. *Sci. Agric. Bohem.*, vol. 35, 131–134.
- Pech, P. (2010). *Speciální případy hydrauliky podzemních vod*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Pech, P., & Novotny, R. (2005). Analytical solutions for well drawdown with well losses: 1. Multiple well system near a boundary. *J. Environ. Hydrol.*, vol. 13, 1–10.
- Petrauskas, A. (2009). Increasing the efficiency of water well regeneration with ultrasound by using acoustic transducers consisting of elements in flexural vibrations. *Ultragarsas/Ultrasound*, vol. 64, 17–23.
- Procházka, M. (2021). *VLASTISLAV U TŘEBENIC, Zpráva o Revizním Karotážním Měření ve Vodárenském vrtu po Provedené Regeneraci*. Praha: SG Geotechnika, a.s.
- Raghavan, R. (1993). Well Test Analysis, 1st ed. *PTR Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA*, 554.

-
- Raghavan, R. (1993). *Well Test Analysis, 1st ed.*; p. 554. Englewood Cliffs, NJ, USA: PTR Prentice Hall.
- Raghavan, R., & Tongpenyai, Y. (1. leden 1981). The Effect of Wellbore Storage and Skin on Interference Test Data. *Journal of Petroleum Technology, Vol. 33, Issue 1*, stránky 151-160.
- Ralph, D., & Stevenson, J. (1995). The role of bacteria in well clogging. *Water Res., vol. 29*, 365–369.
- Ramey, H. J. (1970). *Short-Time Well Test Data Interpretation in the Presence of Skin Effect and Wellbore Storage*. Dallas: Journal of Petroleum Technology.
- Ramey, H., & Agarwal, R. (1972). Annulus unloading rates as influenced by wellbore storage and skin effect. *Soc. Pet. Eng. J., vol. 12*, 453–462.
- Sen, Z. (1989). Nonlinear flow toward wells. *J. Hydraul. Eng. ASCE, vol. 115*, 193–209.
- Sethi, R. (2011). A dual-well step drawdown method for the estimation of linear and non-linear flow Parameters and well skin factor in confined aquifer systems. *J. Hydrol., vol. 400*, 187–194.
- Sousa, E., Barreto, A., & Peres, A. (2016). Analytical Treatment of Pressure-Transient Solutions for Gas Wells With Well Storage and Skin Effects by the Green's Functions Method. *SPE J., vol. 21*, 1858–1869.
- Stehfest, H. (1. leden 1970). Algorithm 368: Numerical inversion of Laplace transforms. *Communications of the ACM, Vol. 13, Issue 1*, stránky 47-49.
- Sterrett, J. (2007). *Groundwater and Wells, 3rd ed.*; p. 812. . New Brighton, MN, USA: Johnson screens—Weatherford comp. ISBN 978-0-9787793-0-6.
- 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. *Transactions of the American Geophysical Union, vol. 16*, 519-524.
- Timmer, H., Verdel, J., & Jongmans, A. (2003). Well clogging by particles in Dutch well fields. *J. Am. Water Work. Assoc., vol. 95*, 112–118.
- Tongpenyai, Y., & Raghavan, R. (1981). The effect of wellbore storage and skin on interference test data, nr. 33. *J. Pet. Technol.*, 151-160.
- Van Beek, C., Breedveld, R., Juhász-Holterman, M., Oosterhof, A., & Stuyfzand, P. (2009). Cause and prevention of well bore clogging by particles. *Hydrogeol. J., vol. 17*, 1877–1886.

- Van Everdingen, A. (1953). The Skin Effect and its influence on the Productive Capacity of a Well. *Journal of Petroleum Technology*, stránky 171-176.
- Van Everdingen, A., & Hurst, W. (1949). The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *J. Pet. Technol.*, vol. 1, 305–324.
- Walton, W. (2007). *Aquifer Test Modeling*. Boca Ralton, FL, USA: CRC Press.
- Wattenbarger, R., & Ramey, H. (1970). An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: II. Finite difference treatment. *Soc. Pet. Eng. J.*, vol. 10, 291–297.
- Wen, Z., Huang, H., & Zhan, H. (2006). Non-Darcian flow in a single confined vertical fracture toward a well. *J. Hydrol.*, vol. 330, 698–708.
- Yang, S., & Yeh, H. (2002). Solution for flow rates across the wellbore in a two-zone confined aquifer. *J. Hydraul. Eng. ASCE*, vol. 128, 175–183.
- Yang, S., & Yeh, H. (2005). Laplace-domain solutions for radial two-zone flow equations under the conditions of constant-head and partially penetrating well. *J. Hydraul. Eng. ASCE*, 209–216.
- Yang, S., & Yeh, H. (2009). Radial groundwater flow to a finite diameter well in a leaky confined aquifer with a finite-thickness skin. *Hydrol. Process.*, vol. 23, 3382–3390.
- Yeh, H., & Chang, Y. (2013). Recent advances in modeling of well hydraulics. *Adv. Water Resour.*, vol. 51, 27–51.
- Yeh, H., & Chen, Y. (2007). Determination of skin and aquifer parameters for a slug test with wellbore-skin effect. *J. Hydrol.*, vol. 342, 283–294.
- Yeh, H., & Wang, C. (2013). A semianalytical solution for residual drawdown at a finite diameter well in a confined aquifer. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, vol. 49, 966–972.
- Yeh, H., Yang, S., & Peng, H. (2003). A new closed-form solution for a radial two-layer drawdown equation for groundwater under constant-flux pumping in a finite-radius well. *Adv. Water Resour.*, nr. 26, 747–757.
- Zhang, G., Wang, S., & Liu, Z. (2003). Ultrasonic regeneration of granular activated carbon. *Environ. Eng. Sci.*, vol. 20, 57–64.

- Zhang, Z., Guo, J., Liang, H., & Liu, Y. (2021). Numerical simulation of skin factors for perforated wells with crushed zone and drilling-fluid damage in tight gas reservoirs. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 90, 103907.
- Zhu, P., Song, Z., Wu, X., Xu, P., Zhang, X., & Zhu, W. (2021). Community Distribution of Biofilms along a Vertical Wellbore in a Deep Injection Well during Petroleum Production. *Energy Fuels*, vol. 35, 1998–2005.

**Curriculum vitae
&
Seznam publikací**

Daniel Kahuda

narozen: 27.červen, 1979, Praha 2 (Česká Republika)

bydliště: Jezuitská 4/12A, 41201, Litoměřice, Česká Republika

E-mail: kahuda@fzp.czu.cz

Vzdělání

- od 2009: postgraduální studium: obor Environmentální modelování, katedra Vodního hospodářství a Environmentálního modelování, Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze
- 2000 – 2003: magisterské studium v oboru zemědělské inženýrství – specializace: Hodnocení a ochrana půdy, Agronomická fakulta, Česká zemědělská univerzita v Praze
- 1997 – 2000: bakalářské studium zemědělské inženýrství, Agronomická fakulta, Česká zemědělská univerzita v Praze

Odborné kursy

- 27.3.-29.3.2017: Advanced modeling of water flow and contaminant transport in porous media using the HYDRUS and HP1 software packages, Czech University of Life Sciences, Prague
- 16.8.-21.8. 2012: Short PhD Course, Model Calibration and Predictive Uncertainty Analysis using PEST, University of Oulu, Finsko
- IX. 2007: workshop: Calibration and Uncertainty evaluation of Groundwater Models / EU Water Framework Directive (TAIEX + TU VŠB Ostrava)
- VI. 2006: Matematické modelování proudění podzemní vody a transportu znečištění ve vadózní zóně (Fakulta stavební – ČVUT)
- IX. 2003 workshop: Groundwater Modelling + Advanced Groundwater Modeling course (Waterloo Hydrogeologic, Inc., CAN + VSB Ostrava – Technical University, CZ)

Publications

IF

- De Filippis, G., Pouliaris, C., **Kahuda, D.**, Vasile, T.A., Manea, V.A., Zaun, F., Panteleit, B., Dadaser-Celik, F., Positano, P., Nannucci, M.S., Grodzynski, M., Marandi, A., Sapiano, M., Kopač, I., Kallioras, A., Cannata, M., Filiali-Meknassi, Y., Foglia, L., Borsi, I., Rossetto, R. Spatial Data Management and Numerical Modelling: Demonstrating the Application of the QGIS-Integrated FREEWAT Platform at 13 Case Studies for Tackling Groundwater Resource Management. *Water* 2020, 12, 41. <https://doi.org/10.3390/w12010041> (IF=3.103; Q2)
- **Kahuda, D.**, Pech P. A New Method for the Evaluation of Well Rehabilitation from the Early Portion of a Pumping Test. *Water*. 2020; 12(3):744. <https://doi.org/10.3390/w12030744> (IF=3.103; Q2)
- **Kahuda, D.**, Pech, P., Ficaj, V., Pechová, H. Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test. *Coatings*. 2021, 11,10. <https://doi.org/10.3390/coatings11101250> (IF=2.881; Q2)
- Ficaj, V., Pech, P., **Kahuda, D.** Software for Evaluating Pumping Tests on Real Wells. *Applied Sciences*. 2021; 11(7):3182. <https://doi.org/10.3390/app11073182> (IF=2.679; Q2)

SCOPUS

- Holub, J., Pech, P., Kuráž, M., Máca, P., **Kahuda, D.** Evaluation of a pumping test with skin effect and wellbore storage on a confined aquifer in the Bela Crkva, Serbia. *International Journal of Water* 2019, 13,1. <https://doi.org/10.1504/IJW.2019.097309> (SJR = 0.199)
- Boukalová, Z., Těšitel, J., Hrkal, Z., **Kahuda, D.** Artificial infiltration as an integrated water resources management tool. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 2014, v. 182, p. 101-210. <https://doi.org/10.2495/WP140181> (SJR = 0.180)
- **Kahuda, D.**, Vach, M., Čerba, O., ...Vohnout, P., Dvořák, V. Nasyp: Online expert tool on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. *Agris On-line Papers in Economics and Informatics*, 2011, 3(3), pp. 61–66.

ODBORNÉ ČASOPISY

- Kukačka, J., **Kahuda, D.**, Pech, P. Nové možnosti hodnocení technického stavu a produkční funkce hydrogeologických vrtů. *Vodní hospodářství*, 2021, roč. 71, č. 2, s. 20-23. ISSN: 1211-0760.

- Boukalová, Z., Těšitel, J., Binod Das Gurung, **Kahuda, D.** Participatory anagement for Rainwater Harvesting in Patan, Nepal. In book: *Water Management and the Environment: Case Studies* 2018.
- Pech, P., **Kahuda, D.** Mathematical modeling of in-situ chemical oxidation with KMnO_4 . *Scientia Agriculturae Bohemica* 2005. 36, 4. 141-146. ISSN 1805-9430.
- **Kahuda, D.**, Pech, P., Máca, P. Monitoring vzniku kolmatace na vodárenských vrtech in-situ. *Vodní hospodářství*, 2016, roč. 66, č.4 s. 2- 6. ISSN: 1211-0760.
- Tasev, G., Serafimovski, T., Boev, B., Stefanova, V., Šimek, J., **Kahuda, D.** Water and soil analyses of some parts in the Kozuf area, R. Macedonia. *Geography*, 2013.
- **Kahuda, D.**, Pech, P., Ficaj, V. Regenerace hydrogeologických vrtů na bázi ultrazvuku. *Vodní hospodářství*, 2021, roč. 71, č. 11, s. 2-8. ISSN: 1211-0760.

Konference.

- Boukalova, Z., Těšitel, J., Hrkal, Z., **Kahuda, D.** Artificial infiltration as integrated water resources management tool, water pollution XII; ISBN: 978-1-84564-776-6, eISBN: 978-1-84564-777-3, pp 201–210. Water Pollution conference 2014, the Algarve, Portugal https://doi.org/10.1007/978-3-319-79014-5_4
- Boukalová, Z., Těšitel, J., Gurung, B. D., **Kahuda, D.** Participatory Management for Rainwater Harvesting in Patan, Nepal. In *International Symposium on Water in Environment*, 2017. pp. 65-83. Springer, Cham.
- Pech, P., **Kahuda, D.**, Hosnedl, P. Mathematical modelling of in-situ chemical oxidation at MOTO CO company. Conference: Finite Element Models, MODFLOW, and More: Solving Groundwater Problems. FEM_MODFLOW. 2004 p. 223-225.
- Burešová, H., **Kahuda, D.**, Šimek, J., Serafimovski, T., Tasev, G., Stefanova, V. Environment and health risks of Kozuf Metallogenic district.. 2014. 2 nd International Workshop on the ENIGMA Project (Ref. No. 1206KEP.008-12), Prague.

Knihy

- Balogh S., Baptista F., Benda P., Bojko J., Brun F., Buitendag A.A.K., Cartolano jr. E.A., Castro Neto M., Cerba O., Cesaretti G.P., Champomier J.C., Charvat K., Charvat jr. K., Cheruy G., Claupein W., Conesa-Munoz J., Crehan P., Csoto M., Csukas B., Dreux B., Dvorak V., Fusai B., Gelb E., Gerhards R., Gnip P., Gravalos I., Havlicek Z., Holster H., Horakova S., Jezek J., **Kahuda D.**, Kateris D., Keller M.,

Kepka M., Kozel J., Krivanek Z., Kubicek P., Link-Dolezal J., Lohr V., Lokers R., Loutridis S., Lukas V., Masselin-Silvin S., Maurer L., Misso R., Molinari F., Moshou D., Musil M., Natsis A., Navarro M., Navas L.M., Oberti J., Oskera M., Pesonen L., Prepin B., Prochazka F., Ribeiro A., Ruiz G., Samie J.F., Saraiva A.M, Sawalhi N., Seaz A., Schmitz M., Silerova E., Svehla M., Teye F., Vach M., Van Der Walt J.S., Varga M., Veiga A.K., Verdouw C., Vohnout P., Waksman G., Weis M., Wissocq A.A.K., Zech C. ICT FOR AGRICULTURE, RURAL DEVELOPMENT AND ENVIRONMENT - Where we are? Where we will go?. Available from:

https://www.researchgate.net/publication/233920880_ICT_FOR_AGRICULTURE_RURAL_DEVELOPMENT_AND_ENVIRONMENT_-_Where_we_are_Where_we_will_go#fullTextFileContent [accessed Feb 11 2022] Edition: IPublisher: Czech Centre for Science and Society, WirelessInfoEditor: Tomas Mildorf, Karel Charvat jrISBN: 978-80-905151--0-9

- Lang, S., Kääb, A., Pechstädt, J., Flügel, W.-A., Zeil, P., Lanz, E., **Kahuda, D.**, Frauenfelder, R., Casey, K., Füreder, P., Sossna, I., Wagner, I., Janauer, G., Exler, N., Boukalova, Z., Tapa, R., Lui, J., and Sharma, N.: Assessing components of the natural environment of the Upper Danube and Upper Brahmaputra river basins, *Adv. Sci. Res.*, 7, 21–36, <https://doi.org/10.5194/asr-7-21-2011>

Metodika

- Pech, P., Máca, P., Kuráž, M., **Kahuda, D.**, Pastuszek, F. 2015. *Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech*. Certifikovaná metodika. TAČR TA 020221249 Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR. Ministerstvo životního prostředí. Č. 50 504/ENV/15. s.24.

Granty a projekty VaVaI

spoluřešitel

- TAČR – TA01020219 PROTĚŽ – Progresivní technologie ochrany životního prostředí a efektivního hospodaření s vodou v malých povodích (2010 – 2013)
- TAČR – TA02021249 Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR (2012 – 2015)
- 7F14341 Assessing water quality improvement options concerning nutrient and pharmaceutical contaminants in rural watersheds (AQUARIUS) (2014 – 2017)

- TAČR – TH02030421 ULTRA – Zařízení pro regeneraci vodárenských jímácích vrtů na principu ultrazvuku (2017-2020)
- TAČR – TH04030492 – INV-FLOW: Zařízení pro zonální měření vertikálního proudění podzemní vody a přímou kvantifikaci přítoků do jímácích vrtů na principu elektromagnetické indukce (2019-2020)
- TAČR – SS01020224 – Malá regenerační souprava MARS (2020-2023)
- INTER-EUREKA – LTE121007 – USOR – Ultrasonic well rehabilitation and water treatment (2021-2023)

Výuka

- Od r. 2003 participace na výuce předmětů „Hydraulika podzemní vody“ a „Transport znečištění v povodí“ v rámci výuky KVHEM, FŽP, ČZU v Praze