

Sonic Information Nr.

# Brunnenregenerierung mit hochenergetischem Ultraschall

Forschungsergebnisse der Universität Prag



## **Brunnensanierung mit der Ultraschallmethode und Bewertung der ihrer Effektivität anhand des Pumpversuchs**

Daniel Kahuda <sup>1,2</sup> Pavel Pech <sup>1, \*</sup>, Václav Ficaj <sup>1, \*</sup> und Hana Pechová <sup>3</sup>

Zitat: Kahuda, D.; Pech, P.; Ficaj, V.; Pechová, H.

Brunnensanierung mittels der Ultraschallmethode und Bewertung ihrer Effektivität anhand dem Pumpversuch. Beschichtungen 202111 1250.

[https://doi.org/10.3390/](https://doi.org/10.3390/Beschichtungen11101250)

Beschichtungen11101250

Akademischer Herausgeber: Alexandru Enesca

Empfangen: 10. September 2021

Angenommen: 12. Oktober 2021

Veröffentlicht: 14. Oktober 2021

Anmerkung des Herausgebers: MDPI bleibt neutral in Bezug auf juristische Ansprüche in veröffentlichten Karten und institutionellen Affiliationen.

Copyright: © 2021 by the authors. Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz. Dieser Artikel ist ein Open-Access-Artikel der unter den Bedingungen der der Creative Commons Attribution (CC BY) Lizenz (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Fakultät für Umweltwissenschaften, Tschechische Universität für Biowissenschaften Prag, Kamýcká 129, 165 00 Prag-Suchdol, Tschechische Republik; kahuda@fzp.czu.cz
2. Vodní Zdroje, a.s., Jindřicha Plachty 535/16, 150 00 Praha 5, Tschechische Republik
3. Abteilung für Landmaschinen, Fakultät für Ingenieurwesen, Tschechische Universität für Biowissenschaften Prag, Kamýcká 129, 165 00 Prag-Suchdol, Tschechische Republik; [pechovah@tf.czu.cz](mailto:pechovah@tf.czu.cz)

\* Korrespondenz:

pech@fzp.czu.cz (P.P.);

ficaj@fzp.czu.cz (V.F.);

Tel.: +420-724-077-070 (P.P.);

+420-608-369-481 (V.F.)

### **Zusammenfassung:**

Die Nutzung von Grundwasserreserven, insbesondere für Trinkwasserzwecke, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Brunnen in einem möglichst guten Funktionszustand zu erhalten. Brunnen sind jedoch bei intensiver Nutzung einem Alterungsprozess unterworfen, der zur Folge hat mit einer Zunahme der aktuellen Widerstände im Brunnen selbst und in seiner unmittelbaren Umgebung (der Skinzone). Dies führt zu einer Abnahme der Leistungsfähigkeit des Brunnens (Abnahme der Fördermenge, Abnahme der Abnahme der Fördermenge, eine Abnahme der spezifischen Ergiebigkeit, eine Zunahme der Absenkung des Brunnens und die Entstehung der Skin Zone). Der erhöhte hydraulische Gradient in der Skin-Zone bewirkt eine Erhöhung der Zuflussrate zum in das Bohrloch, wodurch sich feines Material in Richtung der Verrohrung bewegt. Dieses Material kann die Injektionsöffnungen verstopfen, was zu einer Zunahme der chemischen und biologischen Verstopfung der Skin-Zone führt. In Zusammenarbeit mit der Firma sonic technologies, GmbH. (Sailauf, Deutschland) wurde eine experimentelle, auf Ultraschalltechnologie basierende Brunnensanierungsanlage entwickelt und erfolgreich getestet.

Dieser Artikel beschreibt die prototypische Entwicklung des Ultraschallgeräts, einschließlich seines Einbaus in das Sanierungssset und einer Demonstration seines Piloteinsatzes im MO-4-Pumpbrunnen in der Tschechischen Republik mit einer Bewertung der Sanierungseffekte unter Verwendung der Software der Autoren (Dtest\_ULTRA). Basierend auf der visuellen Inspektion und den Ergebnissen der hydraulischen und geophysikalischen Analyse wurde die

hohe Effizienz der getesteten Technologie in praktisch allen Parameter nachgewiesen, wobei eine Verbesserung im Bereich von 25-55 % gegenüber dem ursprünglichen Zustand identifiziert werden konnte.

Schlüsselwörter:

zusätzliche Widerstände; hydrodynamischer Brunnentest; physische Rehabilitation; Ultraschall; Soft- Ware

## 1. Einleitung

Die Ausbeutung von Grundwasserreserven nimmt derzeit zu. Diese Zunahme gilt auch für die Nutzung des Grundwassers für Trinkwasserzwecke. Außerdem nimmt das Durchschnittsalter der Wasserbrunnen in Europa stetig an [1,2]. Im Laufe ihrer Nutzung unterliegen die Brunnen Alterung unterworfen. Die wichtigsten Phänomene dieses Prozesses sind abnehmende Wassermengen Wassermenge, die gepumpt werden muss, um den gleichen Wasserstand im Brunnen zu erreichen, und eine zunehmende Absenkung des und eine zunehmende Absenkung des Brunnens und seiner unmittelbaren Umgebung (der so genannten Skin-Zone) bei gleicher gepumpten Wasser. Zu den Folgen dieser Phänomene gehören die Erhöhung des hydraulischen Gradienten und der Fließgeschwindigkeit [3]. Die spezifische Ausbeute des Brunnens (well efficiency), die die als das Verhältnis zwischen der geförderten Menge und der Absenkung bezeichnet wird, nimmt in der Folge ab [4].

Die Brunnenalterung wird durch verschiedene physikalische, chemische und biochemische Prozesse verursacht [5-7], wie Verkrustung durch mineralische Ablagerungen, Biofouling durch das Wachstum von Mikroorganismen, physikalische Verstopfung der nahe gelegenen Brunnen, in denen das Wasser durch Sedimente übertragen wird (Brunnen Beschichtungen 2021, 11, 1250. <https://doi.org/10.3390/coatings11101250> <https://www.mdpi.com/journal/coatings>, durch Versandung, die durch die Übertragung von Materialien in den Brunnen verursacht wird), durch Korrosion des Brunnenfilters oder der Verrohrung und die Bildung von Verkrustungen durch die Ablagerung von Karbonaten, Aluminiumhydroxid Aluminiumhydroxidablagerungen und/oder Eisen- und Manganablagerungen (Kalziumkarbonat, Eisenbakterien, Schlamm, Ton und "Schleim" sind allesamt häufige Brunnenverstopfungen) [8-15].

Die Maßnahmen zur Beseitigung dieser Probleme werden als Brunnensanierung (Wiederherstellung oder Regeneration) bezeichnet [16]. Im Allgemeinen gibt es zwei Hauptkategorien der Brunnen die chemische und die physikalische (mechanische) Sanierung. Bei der chemischen Brunnensanierung wird das Krustenmaterial mit anorganischen oder organischen Säuremischungen aufgelöst, die in den Brunnen gepumpt werden und dort belassen, bis sich die Beläge aufgelöst haben. Die verschiedenen chemischen Sanierungsverfahren unterscheiden sich in der Zusammensetzung der Lösungsmittel und in der Art und Weise, wie das Lösungsmittel in den Filterkies eingebracht wird [5]. Die chemische Sanierung hat den großen Nachteil dass die meisten dieser Chemikalien umweltschädlich sind.

Zu den physikalischen Methoden gehören das Anbringen einer Bürste an einem Bohrer mit Hochdruckstrahlverfahren, Hydrofracturing und Surging. In den letzten Jahren wurde eine der als physikalische Methode kategorisierten physikalischen Verfahren, das Ultraschallverfahren, für die Brunnensanierung eingesetzt [17,18]. Diese relativ neue Technologie wurde zuvor für Ölbohrungen untersucht und angewandt [19-25]. wird jetzt auch bei der Sanierung von Wasserbrunnen eingesetzt [26-29]. Hydrodynamische Tests, insbesondere Pumpversuche, werden eingesetzt, um die Wirksamkeit der Brunnensanierung zu bewerten. Hydrodynamische Tests werden durchgeführt, um die hydraulischen Parameter des Grundwasserleiters zu bestimmen des Grundwasserleiters (hydraulische Leitfähigkeit, Transmissivität und Speicherkapazität) und zur Bestimmung der Parameter des Förderbrunnens selbst (der Koeffizient der aktuellen Widerstände, der sogenannte Skin Faktor und die Speicherkapazität des Brunnens). Im Jahr 1935 veröffentlichte Theis [30] eine Lösung für die Grundgleichung die die instationäre radialsymmetrische Strömung zu einem idealen Brunnen für ein Reservoir mit einer belasteten

Oberfläche auf der Grundlage idealisierter Annahmen. Theis verwendete eine analoge Gleichung für Wärmeübertragung durch ein festes Medium zur Beschreibung der Grundwasserströmung durch ein poröses Medium zu beschreiben. Diese Lösung wird verwendet, um die Transmissivität und die Speicherfähigkeit des Aquifers zu bestimmen für einen Brunnen ohne zusätzliche Widerstände und mit einem vernachlässigbar kleinen Radius. Diese Methode ist als Theis-Kurvenmethode bekannt. Cooper und Jacob [31] vereinfachten die Theis-Brunnenfunktion. Bei längeren Pumpversuchszeiten entwickelt sich während der Absenkung ein linearer Abschnitt der Absenkung gegen den Logarithmus der Zeit; von der Theis-Brunnenfunktion werden nur die ersten beiden Terme beibehalten Brunnenfunktion (der Fehler in den Berechnungen muss weniger als 0,01-0,25% für das Argument der Theis-Funktion). In realen Bohrlöchern wird der Verlauf des Pumpversuchs durch zusätzliche Widerstände (ausgedrückt durch den Skin-Effekt). Van Everdingen [32] und Hurst [33] waren die Ersten, die die zusätzlichen Widerstände des Bohrlochs und seiner unmittelbaren Umgebung in Ölbohrloch Berechnungen ein. Hawkins [34] führte zusätzliche Widerstände in die Berechnungen ein als eine Zone um das Bohrloch mit veränderter hydraulischer Leitfähigkeit (K) ein. In der Anfangsphase des Pumpversuchs hat das tatsächliche Bohrlochvolumen (die so genannte Bohrlochspeicherfähigkeit) einen bedeutenden Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Absenkung, der in der Untertagehydraulik erstmals von Papadopulos und Cooper [35] und dann in einem Ölfeld von Ramey [36] behandelt. Die grundlegende Lösung der der Gleichung für eine instationäre radialsymmetrische flüssige Strömung in einem vollständigen Bohrloch unter Berücksichtigung zusätzlicher Widerstände und der Auswirkung des Brunnenvolumens wurde 1970 von Agarwal et al. veröffentlicht [37]. In der Folge leitete eine Reihe von Autoren verschiedene Verfahren und Methoden abgeleitet - z. B. die Verwendung von Typkurven zur Bestimmung der zusätzlichen Widerstände und der Bohrlochstorativität aus einem Pumpversuch [38-46]. Die Laplace-Transformation war eine Die Laplace-Transformation war eine der ersten Techniken, die zur Lösung der grundlegenden partiellen Differentialgleichung des stationären Zustands verwendet wurde, radialsymmetrischen Zuflusses zu einem Bohrloch (siehe van Everdingen und Hurst [47]). Der Stehfest Algorithmus 368 [48] wurde zur Invertierung der Laplace-Transformation in der Software Dtest\_ULTRA verwendet.

Die Autoren dieser Arbeit entwickelten eine Software, die die Laplace-Transformation und den Stehfest-Algorithmus Dtest\_ULTRA eine Software entwickelt, mit der sich der "Skin-Faktor" vor und nach der vor und nach der Sanierung sowie aus den Abschnitten von Pumpversuchen, in denen die Liniensegmente nicht mit der klassischen Cooper-Jacob-Methode ausgewertet werden können [49,50]. Beschichtungen 2021, 11, 1250 3 von 24 2. Materialien und Methoden

## 2.1. Ultraschall

Ultraschall ist eine mechanische Welle, die durch die gegenseitige Schwingung von elastischen Teilchen mit Frequenzen über 20 kHz, also außerhalb des menschlichen Hörbereichs. Je nach Frequenz werden Ultraschallwellen in eine von drei Kategorien eingeteilt: Leistungultraschall, mit einer Frequenz von 20-100 kHz; Hochfrequenzultraschall, mit einer Frequenz von 100 kHz bis 1 MHz und diagnostischer Ultraschall mit Frequenzen von 1-500 MHz. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen nimmt mit zunehmender Umgebungsdichte zu (d. h. mit geringerem Partikelabstand). So breiten sich die Wellen in Gasen am langsamsten, in Flüssigkeiten am schnellsten und in Feststoffen am schnellsten in Festkörpern. Die Quelle des künstlich erzeugten Ultraschalls ist ein Ultraschallgenerator. Für Ultraschall mit niedriger Intensität [3] sind diese Generatoren Pfeifen, Stimmgabeln und Sirenen, die die in der Lage sind, Frequenzen <200 kHz zu erzeugen. Für höhere Frequenzen werden elektromechanische (piezoelektrische) oder magnetostruktive Generatoren (Schallwandler) verwendet. Ein magnetostruktiver Wandler funktioniert nach dem Prinzip, dass sich die Größe des ferromagnetischen Materials wenn es in ein magnetisches Wechselfeld gebracht wird. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschall Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwelle hängt von der Elastizität und Dichte des Mediums ab, das sie durchläuft [51]. Für Wasser beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen 1480 m/s. Ultraschallschwingungen können durch drei Arten von Generatoren erzeugt werden:

1. Mechanisch (kleine Stimmgabeln und Trillerpfeifen: niedrige Frequenz und Leistung);
2. Magnetostruktiv (Schwingungen um einen Eisenstab im Magnetfeld eines mit Wechselstrom betriebenen Elektro- Magneten, der mit Wechselstrom betrieben wird: hohe Leistung, aber mit einer Frequenz von nur bis zu 100 kHz - verwendet in der Zahnmedizin und Chirurgie);
3. Piezoelektrisch (ein Siliziumplättchen, das mit Elektroden verbunden ist und an das eine Wechselspannung der mit der gleichen Frequenz wie die Spannung schwingt und die Energie von elektrischer in mechanische Energie umwandelt, die in Schwingungen versetzt wird für diagnostische und therapeutische Zwecke verwendet).

Eine hohe Frequenz erzeugt sehr kurzweilige Ultraschallwellen, bei denen Druckveränderungen in der Größenordnung von MPa bei höheren Intensitäten auftreten.

1. Thermische Wirkungen: Die Energie der Welle ist direkt proportional zum Quadrat der Frequenz. An der Schnittstelle von Geweben mit unterschiedlicher akustischer akustischer Impedanz (Weichgewebe X Knochen = Periostschmerz).
2. Mechanische Wirkungen: Der Durchgang der Ultraschallwelle durch die Umgebung führt zu lokalen Druckänderungen (MPa/mm). Mechanische Wellen, und damit Schall, propa- in allen Zuständen der Materie durch Bindungen zwischen Teilchen. Wenn die Energie der Schwingungsbewegung auf benachbarte Teilchen übertragen wird und zu einer Ausbreitung der Ausbreitung der Schwingung führt, dann wird das Medium als elastisch bezeichnet.
3. Physikalisch-chemisch: Ultraschall hat dispersive Wirkungen, das heißt, dass feine Suspensionen, Emulsionen Suspensionen, Emulsionen, Schäume usw. hergestellt werden können, zusätzlich zu den koagulativen Wirkungen (z.B. bei der Reinigung von Gasen).
4. Biologisch: Bis zu einer Intensität von 3 W/cm hat Ultraschall biopositive Wirkungen, wie z.B. die Beschleunigung des Stoffwechsels. Bei Intensitäten von mehr als 3 W/cm führen diese Effekte zu irreversiblen morphologischen Veränderungen, wie z. B. dem Zerfall des Zellkerns und die thermische Koagulation von Proteinen.

Einer der einschränkenden Faktoren beim Einsatz von Ultraschallwellen für die Sanierung von Produktionsbohrungen ist die Eindringtiefe der Welle in die Umgebung, die umgekehrt proportional zur Frequenz der Ultraschallwelle ist. Bei Verrohrung und Kieshinterfüllung ist dies in der Praxis 25-35 cm, was der Entfernung entspricht, in der die Wellenamplitude in einer bestimmten Umgebung auf die Hälfte ihres ursprünglichen Wertes abfällt. Grundsätzlich wird weniger kinetische Energie in Flüssigkeiten und Festkörpern weniger kinetische Energie absorbiert als in Gasen. Die Wirkungen des Ultraschalls sind sowohl mechanisch als auch thermisch. Die Ausbreitung von Ultraschall in einem Medium bringt die Moleküle des Mediums in Schwingung, was zu schnellen Druckänderungen führt. Beim Durchgang von Ultraschall durch organisches Gewebe wird ein Großteil der Energie in mechanische Energie umgewandelt, die das Gewebe in Schwingungen versetzt und führt zu Veränderungen in den Eigenschaften der Zellmembranen (physikalisch-chemischer Effekt), Beschichtungen 2021, 11, 1250 4 von Aufspaltung von Substanzen mit hohem Molekulargewicht (chemische Wirkung) [7] und Absorption von mechanischer Energie (biologische Wirkung).

Bei der Sanierung von Brunnen mit Ultraschalltechnik werden vier Hauptverfahren verwendet:

1. Die Entfernung harter Verkrustungen aufgrund von Unterschieden in der Verformung der Körner des Kiesfilters und Oberflächenausfällungen. Dies wird durch den Unterschied in der mechanischen Verformung an der Materialgrenzfläche.
2. Die Verflüssigung der organischen Moleküle durch die mechanische Beanspruchung durch Ultraschall wandelt die großen organischen Moleküle in kleinere um. Dieser Prozess führt zu einer gewissen Grad zu einer Abtötung von Viren und Bakterien.
3. Die Ultraschallenergie führt zu Bewegungen in der Molekularstruktur der Verkrustung. Infolgedessen kommt es zu einem Abrieb innerhalb des Kiesel, der die Beschichtung abschleift.

4. Kavitation. Der sogenannte Kavitationseffekt ist bis zu einer Tiefe von ca. 50 m wirksam. Durch die Kavitation wird an der Kiesoberfläche anhaftendes Material abgetragen.

## 2.2. Zusätzliche Widerstände

Bei der Bohrlochintervention geht es im Wesentlichen um die Verkleinerung zusätzlicher Druckentlastungsporen im Brunnen und seiner unmittelbaren Umgebung. Der Begriff "zusätzliche Widerstände" bezieht sich auf eine Reihe von Phänomenen, die eine Abweichung der gemessenen Werte der Wasserabsenkung am realen Brunnen im Vergleich zu der theoretischen Absenkung, die durch die Annahme eines idealen (ohne zusätzliche Widerstände) des Wasserzuflusses in den vollen Brunnen erhalten hat. Die zusätzlichen Widerstände führen dazu, dass die meisten Brunnen mit der Zeit ihre spezifische Kapazität verlieren. Dies ist in erster Linie zurückzuführen auf Alterung des Brunnens durch mechanische, chemische und biologische Prozesse. Einige Arten zusätzlicher Widerstände können während des Bohrvorgangs auftreten, was zu Mängeln und Unzulänglichkeiten der Bohrtechniken und -technologien führen, insbesondere bei der Ausrüstung für das Bohrloch selbst, z. B. eine Verringerung der Durchlässigkeit in der unmittelbaren Umgebung des Bohrlochs aufgrund Eindringen der Bohrspülung in die poröse wassergesättigte Umgebung beim Drehbohren, was zu sogenanntem "Waterlogging" führt. Dies kann durch eine "Schlammkruste" verursacht werden oder durch Impaktbohrungen, bei denen die poröse Umgebung in der Nähe des Bohrlochs verdichtet wird, was zu einer Verringerung der Durchlässigkeit führt [12,13,39,52].

Andere Ursachen können verschiedene hydromechanische, chemische und biologische Phänomene sein, die in und um das während der Nutzung des Bohrlochs in und um das Bohrloch auftreten können. Wissen der Größe der zusätzlichen Absenkung oder der zusätzlichen Absenkung, die auf die Wirkung der aktuellen Widerstände zurückzuführen ist, ist von wesentlicher Bedeutung für die Bestimmung der Effizienz des Brunnens und kann zur Überwachung des Alterungsprozesses des Brunnens verwendet werden.

Chemischer Abbau wird am häufigsten in Gebieten beobachtet, in denen das zufließende Wasser übermäßig viele gelöste Mineralien enthält. Diese Art der Verschlechterung wird durch die Ablagerung von Mineralien an verschiedenen Teilen des Brunnens. Die am häufigsten vorkommenden Substanzen sind Kalzium Carbonat, Magnesiumcarbonat, Calciumsulfat sowie Mangan- und Eisenhydroxide.

Der biologische Abbau wird durch Bakterien verursacht, die in den meisten Grundwasserleitern natürlich vorkommen. Diese Bakterien lassen sich in drei grundlegende Gruppen einteilen. Die erste und am weitesten verbreitete Gruppe umfasst Eisenbakterien. Diese Bakterien verursachen die Oxidation von Eisenverbindungen und produzieren Eisenhydroxid, eine rote anorganische Substanz, die sich durch einen biologischen Prozess Substanz. Diese Substanz hat einen schleimigen Charakter und lagert sich an den Wänden des Bohrlochs, der einzelnen Pumpenabschnitte und der Umgebung des Brunnens ab. Bei Kontakt mit der Luft ausgesetzt ist, verfestigt sich Eisenhydroxid und kann weitaus größere Schäden verursachen. Die zweite Gruppe umfasst Bakterien, die Schwefelverbindungen abbauen. Diese Bakterien finden sich in extrem saurem Wasser - sogar in solchen mit einem pH-Wert von 1. Die letzte Gruppe umfasst schleimproduzierende Bakterien, die mit den oben genannten Bakterienarten koexistieren. Der am häufigsten vorkommende Schleim befällt Teile der Pumpe, aber Schleim kann auch das Filtergehäuse des Brunnens und die Poren im Wasser verstopfen.

Alle diese Abbauprozesse führen zu Veränderungen in der hydraulischen Leitfähigkeit von Teilen des Brunnens und des angrenzenden Grundwasserleiters.

Die Summe all dieser Faktoren wird als Skin-Effekt bezeichnet. Ein Teil des zusätzlichen Widerstands wird z. B. durch Verstopfung (Beschädigung) des Brunnens verursacht, d. h. durch Verstopfung der Poren durch feines Material, das die Durchflussrate des porösen Mediums verringert; durch Gesteins- oder Schlickpartikel die sich in den Filterlöchern festsetzen, einschließlich chemischer Verkrustung und Verstopfung der Filterbohrungen durch Mikroorganismen und Bakterien; oder durch unvollständige Öffnung des Aquifers durch den Brunnen (ein



Die Gesamtabenkung des Brunnens kann wie folgt ausgedrückt werden (siehe Abbildung 1)

$$s_w = s_{te} + s_{skin}$$

(3)

Dabei ist  $s_w$  die Gesamtabenkung (m) und  $s_{te}$  die theoretische Absenkung (ohne zusätzliche Widerstände) (m).

Als Kenngröße für den Brunnenzustand verwenden wir die spezifische Ergiebigkeit des Brunnens, die das Verhältnis zwischen der aus dem Brunnen gepumpten Wassermenge und der Gesamtabenkung [53]:

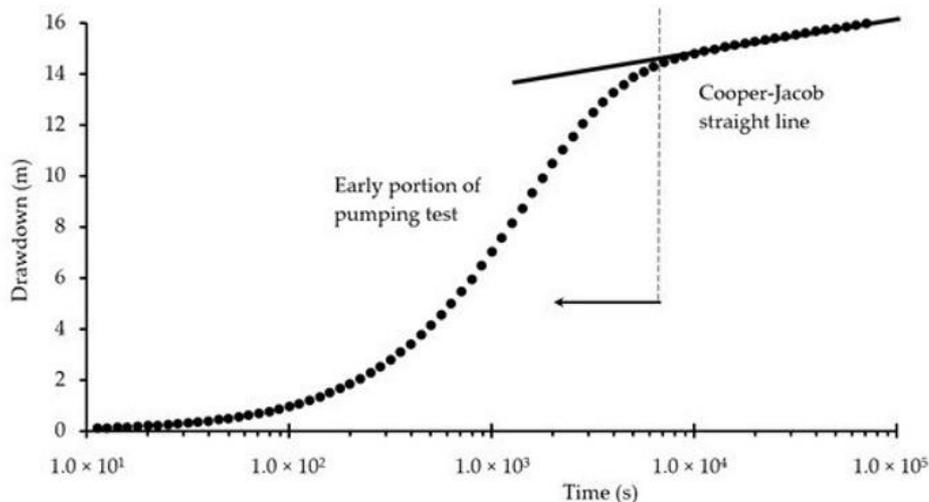
$$q = Q s_w$$

(4)

Dabei ist  $q$  der spezifische Ertrag ( $m^3/s$ ).

Ein typisches Diagramm eines Pumpversuchs, dargestellt in semilogarithmischer Form als Absenkung gegen einen Logarithmus der Zeit, ist in Abbildung 2 dargestellt, zusammen mit einem Abschnitt, der nach der Cooper-Jacob-Methode bewertet werden kann.

Abbildung 2. Diagramm eines Pumpversuchs mit dem Anfangsabschnitt und dem Cooper-Jacob-Abschnitt.



Für den Cooper-Jacob-Abschnitt (Abbildung 2) kann die Beziehung [54] in der Form für Grundwasser verwenden, um den Skin-Faktor zu ermitteln:

$$s_{skin} = \frac{Q}{4\pi T} (\ln 2.246 T r_w^2 S + 2SF)$$

(5)

wobei  $S$  die Speicherefähigkeit des Aquifers (-),  $r_w$  der Brunnenradius (m) und  $t$  die Zeit (s) ist.

Als nächstes wird der Koeffizient der zusätzlichen Widerstände (Skin-Faktor) ausgedrückt:

$$SF = \frac{2\pi T s_w Q}{12 \ln 2.246 T r_w^2 S}$$

(6)

Wenn in dieser Studie kein Abschnitt mit der Cooper-Jacob-Methode auswertbar war, wurde der Skin-Faktor im Feldbeispiel mit der in [50] beschriebenen Software `Dtest_ULTRA` bestimmt.

In dem Artikel wurden die folgenden dimensionslosen Parameter verwendet [50,55]:

- Dimensionslose Zeit

$$t_D = T r^2 w S \quad (7)$$

- Dimensionsloser Radius

$$r_D = r / r_w \quad (8)$$

wobei  $r$  = Entfernung vom gepumpten Bohrloch (m).

- Dimensionslose Absenkung

$$s_D(r_D, t_D) = 2\pi T Q (s(r, t)) \quad (9)$$

- Dimensionslose Absenkung an einem Brunnen

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

- Dimensionslose Bohrlochspeicherung [8]

$$C_D = C 2\pi S r_w^2 \quad (11)$$

wobei  $C$  der Einheitsfaktor der Bohrlochspeicherung ist ( $m^3$ ),  $s(r, t)$  ist die Absenkung in der Entfernung  $r$  und der Zeit  $t$  (m) und  $s_w$  die Absenkung an einem Brunnen (m) ist.

Für instationäre Abflüsse in Form von dimensionslosen Parametern gilt die bekannte Diffusionsgleichung in den radialen Koordinaten die Form [37,40,50,56-58]

$$\partial^2 s_D / \partial r_D^2 + 1/r_D \partial s_D / \partial r_D = \partial s_D / \partial t_D \quad (12)$$

Die Anfangs- und Randbedingungen sind [37,50]

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

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

Die äußere Randbedingung ist:

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

Die innere Randbedingung, wenn der Effekt der Bohrlochspeicherung eine große Rolle spielt und der Skin-Faktor konstant ist [32]

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

$$C_D \partial s_D / \partial t_D - (r_D \partial s_D / \partial r_D)_{r_D=1} = 1$$

(17)

Die Grundgleichung (12) wird durch eine Laplace-Transformation gelöst. Der folgende Typ von Transformationsfunktion wird verwendet, um die partielle Differentialgleichung in dimensionslosen Parameter in eine gewöhnliche Differentialgleichung umzuwandeln [59,60]:

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

(18)

Die transformierte Lösung im Laplace-Bereich für den dimensionslosen Bohrlochabzug nach unten ist:

$$swD = \frac{K_0(p^{1/2}) - SF p^{1/2} K_1(p^{1/2})}{p [p^{1/2} K_1(p^{1/2}) + CD p^{1/2} (K_0(p^{1/2}) + SF p^{1/2} K_1(p^{1/2}))]}$$

(19)

where  $p$  is the Laplace operator;  $K_0$  and  $K_1$  are the zero and unit order modified Bessel functions,

wobei  $p$  der Laplace-Operator ist;  $K_0$  und  $K_1$  sind die modifizierten Bessel-Funktionen nullter bzw. einheitlicher Ordnung sind; und  $SF$  der Skin-Faktor (-) ist.

Die dimensionslose Absenkung an einem Brunnen und  $swD$  wurde durch numerische Stehfest-Inversion erhalten [41]:

$$sWD(tD) = \ln(2)t \sum_{i=1}^N V_i swD^{-1} (p)$$

(20)

$$p = i \ln(2)t$$

(21)

$$V_i = (-1)^{n+1-i} \sum_{k=[i+12]}^{\min(i,n)} \frac{k n^2 (2k)!}{(n-k)! (k-1)! (i-k)! (2k-i)!}$$

(22)

$sWD$  ist die dimensionslose Bohrlochabsenkung in einem realen Bereich, und  $sWD$  ist die Lösung der dimensionslosen Bohrlochabsenkung für  $rD$  und  $tD$  im Laplace-Raum (-).

Für die Absenkung an einem Bohrloch ist es:

$$sw(rw,t) = Q_2 \pi T \sum_{j=1}^k con(j,k) \sum_{i=0}^m (mi)^{-1} i.$$

$$K_0(c^{1/2}) - SF c^{1/2} K_1(c^{1/2}) / c [c^{1/2} K_1(c^{1/2}) + CD c^{1/2} (K_0(c^{1/2}) + SF c^{1/2} K_1(c^{1/2}))]$$

(23)

Wobei  $k = n/2$ ;  $m = k + 1 - j$ ; und  $c = (m + i) (\ln(2)/tD$ .

$$con(j,k) = (-1)^{j-1} \frac{k!}{(k-j)!} j^{m-k-1} \ln^2 tD (2^m)! m! (m-1)!$$

(24)

Gleichung (24) wurde in der Software  $Dtest\_Ultra$  [50] verwendet.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Entwicklung der Ultraschall-Brunnenbergungsanlage

Im Jahr 2017 begannen die Arbeiten zur Entwicklung einer experimentellen, auf Ultraschalltechnologie basierten Brunnensanierungsanlage. Die Entwicklung der eigentlichen Ultraschallwellenemitter, einschließlich ihrer Installation und Verkabelung, wurde von SONIC Technologies, GmbH. aus Deutschland durchgeführt. Ausgehend von den Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit des unter hydrostatischem Druck bis zu 25 bar wurde die Ultraschallsonde nach dem auf dem Prinzip der magnetostriktiven Emittent, einschließlich der entsprechenden Energieübertragung und Steuereinheit (Abbildung 3).



Abbildung 3. Laborprüfung von Ultraschallsendern (SONIC Technologies, GmbH, Sailauf, Deutschland).

Das Herzstück des Ultraschallgeräts besteht aus einzelnen Schaltnetzteilen zur Ansteuerung der einzelnen Leistungspfade der Ultraschallsender, die über ein paarweise über eine Schwachstromsteuerung verbunden sind. Die effektive Frequenz der Sender ist auf 20 kHz festgelegt, und die Schaltfrequenz ist auf ein ideales Leistungsverhältnis optimiert. Die Schaltfrequenz wurde also mit Blick auf die praktische Effizienz der Anwendung entwickelt, und es wurden Sicherheitsmerkmale hinzugefügt, die eine frühzeitige Abschaltung bei einer unzureichenden Kühlung des Geräts oder einer Fehlbedienung. Die Ultraschallsender sind in einer tauchfähigen Sonde untergebracht. Zusätzlich zu den Spezifikationen der eigentlichen Wellenerzeugung<sup>4</sup> der Wellenerzeugung und -effekte wurden bei der Konstruktion auch Fragen der Stromversorgung, der Schaltung, der Steuerung, Kühlung und Spülung innerhalb der zurückgewonnenen Anlage.

Im Jahr 2017 wurden die ersten Feldversuche mit dem Vorprototyp durchgeführt (basierend auf einem älteren Entwurf von N. Patzner, Sonic Umwelttechnik, GmbH), der aber aufgrund seiner ungünstigen Betriebsabmessungen war der Prototyp nur eine Testplattform für die weitere Entwicklung.

Das Testmodell demonstrierte die grundsätzlichen Funktionseigenschaften des Verfahrens in Verbindung mit einer Tauchpumpe und die Wirksamkeit der getesteten Prinzipien. Unzulänglichkeiten zeigten sich jedoch bei der Leistungsübertragung und der Steuerung der einzelnen Emittenten.

Die Erprobung erfolgte in einem flachen Versuchsbrunnen auf dem Gelände der Baugrund Süd GmbH am Standort Bad Wurzach, Deutschland, durchgeführt. In den Jahren 2018 und 2019 wurden nacheinander die Prototypen 1 und 2 gebaut und in eine Tauchsonde eingesetzt. Die Entwicklung des Ultraschallgerätes wurde mit Prototyp 3 im Jahr 2020 abgeschlossen [61].

#### 3.2. Maschinenplattform

Die unterstützende Maschinenplattform bietet die notwendige Manipulations-, Steuerungs- und Ressourcenbasis für den Betrieb der Sonde mit der Ultraschallwellen-Sendereinheit und ermöglicht gleichzeitig die Integration von Geräten für andere Sanierungstechniken (das Grundspektrum mechanischer und ggf. chemischer Verfahren), die in der betrieblichen Praxis

die in der betrieblichen Praxis für den Zugang zu den sanierten Oberflächen der Auffangschächte für die Eingabe der Ultraschallsonde. Die Sanierungsbaugruppe wurde so entwickelt, dass sie autark ist, d.h. möglichst unabhängig in Bezug auf die Unterstützung anderer Maschinen und Transport Maschinen und Transporteinrichtungen sowie für den Betrieb ohne ausreichend leistungsfähigen

elektrische Verbindung. Die Maschinenplattform umfasst eine standardisierte Palette von Ausrüstungen und Merkmale:

- Einen Kran mit einer Mindesttragfähigkeit von 2500 kg, der sich in zwei Achsen bewegen kann, und einer Mindesthubhöhe von 12 m;
- einen AC-Stromgenerator mit einer Wirkleistung von 40 kW und 32 A;
- eine Maschinenwinde für die Stromkabel der Ultraschallsender;
- Ein Stahlrohrsystem mit einer Gesamtlänge von 200 m;
- Die Möglichkeit, einen gezogenen Kompressor anzuschließen.
- Steuerungen und Sicherheitsmerkmale: Für die Ultraschallsanierungsbaugruppe wurden spezielle Steuerungen und Sicherheitsmerkmale entwickelt und auf der Maschinenplattform installiert:
- Elektrische Schalttafel - Diese Vorrichtung ermöglicht die Übertragung von Energie aus dem eigenen Aggregat oder einer externen Quelle zu den Ultraschallgebern und der Betriebspumpe.

Diese Schalttafel ist mit Steuer- und Überwachungselementen für den Betrieb der einzelnen Emitter, Steuerungen und Pumpensteuerungen sowie integrierte Sicherheitselemente für (a) manuelles und (b) automatisches Abschalten der Kabelaufwicklung bei Überschreitung der sicheren Zugkraft.

Frequenzumrichter - Dies ist der grundlegendste Teil des Windenumbaukabels und ermöglicht die Steuerung der Aufwickelgeschwindigkeit und die Umkehrung des Seils (d. h. das Abwickeln).

- Stromkabel: Ausgehend von den berechneten Abmessungen für die Übertragung von 15 kW Ultraschalleistung vom Sender und der Tauchpumpe haben wir ein 5 m x 6 m großes Stromkabel mit Erdungsmöglichkeit verwendet.

Abbildung 4 zeigt die Modifikationen der Steuer- und Sicherheitselemente.

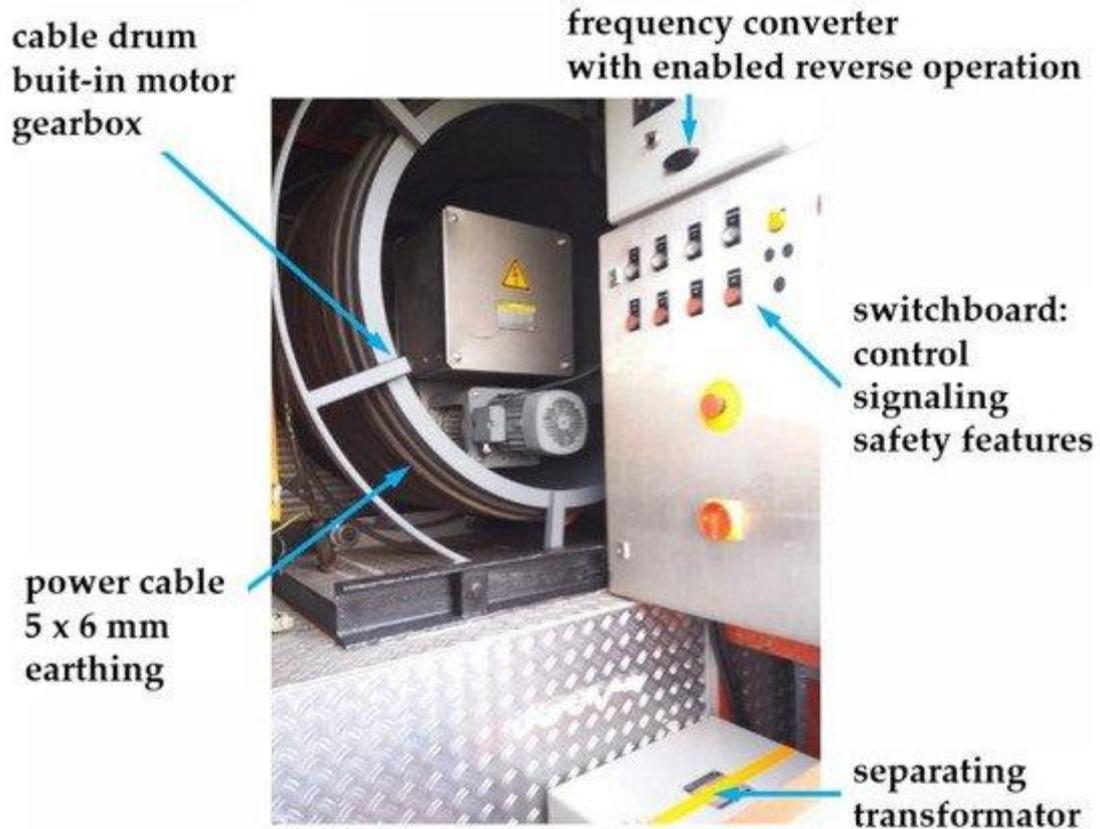


Tabelle 1. Technische Daten für das Ultraschallset.

Technische Daten für den einzelnen Emitter

Betriebsfrequenz	20 kHz
Nennleistung	3300 Watt
Gewicht ca.	18 kg
Schallabstrahlende Fläche	85 x 185 mm
Schallenergie pro Fläche	20 W/cm

Technische Daten Gesamtsonde

Anzahl Transmitter	3
Gesamtleistung	10 kW
Anschlusswert	12 kVA
Netzspannung	230/400 V – 50 Hz



Abbildung 5. Ultraschallsonde in Aktion (Prototyp von SONIC TECHNOLOGIES, Inc.).

### 3.3. Einsatz des Ultraschallgeräts bei der Sanierung des Bohrlochs MO-4 und Bewertung der Auswirkungen des Sanierungseingriffs

#### 3.3.1. Fallstudie

Der Brunnen MO-4 befindet sich in Nordböhmen (Tschechische Republik - 50,50 N, 13,95 E) innerhalb des Vlastislav-Pumpwerkes und wird von einem großen regionalen Wasserwerksunternehmen betrieben (Abbildung 6).

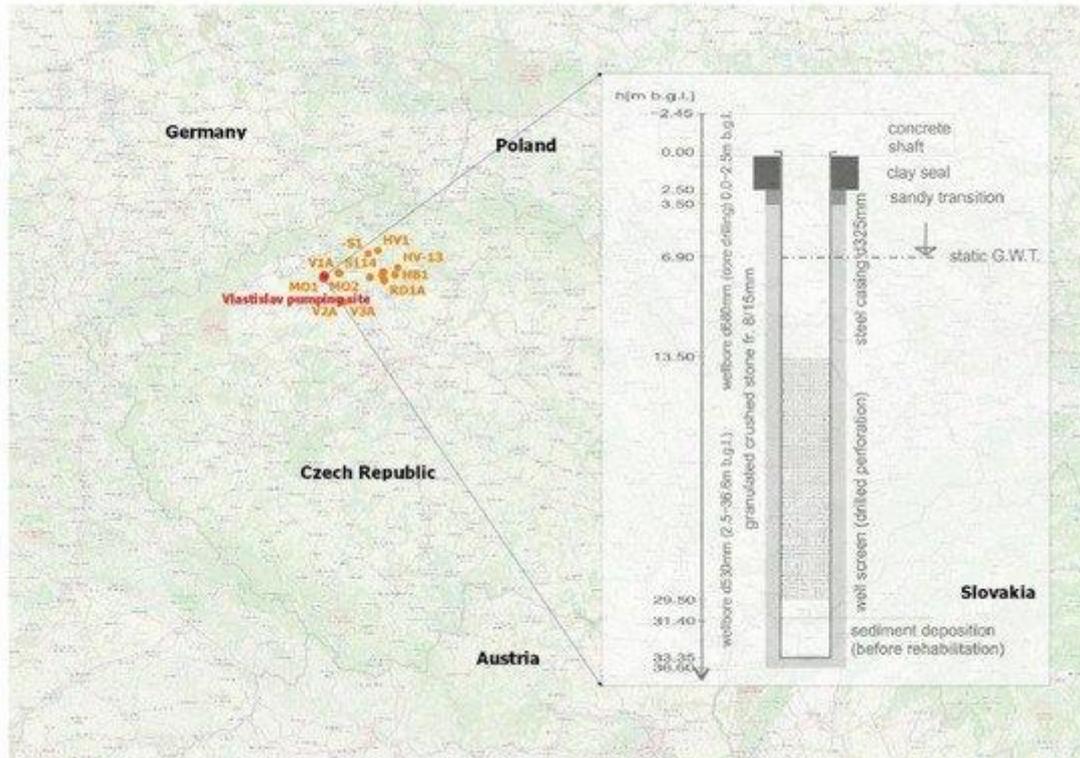


Abbildung 6. Standort des Brunnens MO-4 und schematische Darstellung des Brunnens.

Der Standort wurde in den 1960er Jahren durch die Nutzung eines Quellzuflusses (einer so genannten "Kapelle") zu einem lokalen Bach namens "Modla". Insgesamt wurden fünf neue Pumpbrunnen gebaut um die Pumpkapazität des Standorts zu erhöhen. Im Jahr 1967 wurde der Pumpbrunnen MO-4 gebohrt bis zu einer Endtiefe von 36 m gebohrt. Der Bohrdurchmesser beträgt 530 mm, der Durchmesser des Stahlrohrs von 325 mm. Das Bohrlochsieb besteht aus einer Bohrung, und der Filter ist aus granulierten Steinen, die auf 8/15 mm fraktioniert sind. Der Pumpbrunnen ist in einem phreatischen Grundwasserleiter gefasst, wobei die anfängliche Pumpleistung auf bis zu 5 L/s geschätzt wird.

### 3.3.2. Geologie und Lithologie

Aus hydrogeologischer Sicht befindet sich der Brunnen in der nordwestlichen Ecke eines regionalen turonischen (spätkreidezeitlichen) Grundwasserleiters mit einer lokalen Tiefe von nicht mehr als 13 m (siehe: <https://mapy.geology.cz/geocr50/?extent=-772846.0823%2C-995356.9083%2C-765729.1785%2C-991236.3851%2C102067> (abgerufen am 23. August 2021)).

Diese Schicht überlagert einen ähnlich eckigen und kleinen Grundwasserleiter aus dem Cenoman, der 20 m tief ist. Der darunter liegende Grundwasserleiter aus dem Perm (Paläozoikum) hat nur einen geringen hydrogeologischen Einfluss (1-2 m Mächtigkeit), und es gibt mehrere Brüche im umgebenden porösen Material mit hauptsächlich lokaler Bedeutung. Der Grundwasserleiter ist vertikal begrenzt durch eine darunter liegende Felsschicht aus proterozoischem Gneis begrenzt, und in einer Tiefe von etwa 55 m ist verwittertes Grundgestein vorhanden.

die für eine allgemeine Wasserversorgung erforderlichen Indikatoren. Aufgrund der Tiefe des kreidezeitlichen Grundwasserleiters (bezogen auf sein Alter und sein lithologisches Profile) ist die Wasserhärte mäßig und signifikante Mengen an Ca, Na und Mg sowie erhöhte Konzentrationen von Fe.

Der Standort befindet sich auf einer Höhe von 313 m über dem Meeresspiegel.

### 3.4. Brunnensanierung

Das spezifische Ziel bei der Sanierung des MO-4 Vlastislav-Pumpbrunnens war der Einsatz der Ultraschallmethode in einem Umfeld, in dem keine anderen Techniken anwendbar waren (mit Ausnahme des Lufthebers). Aufgrund des beträchtlichen Alters und des schlechten technischen Zustands des Brunnens drohte der Einsatz anderer mechanischer oder chemischer Techniken die Anlage, die nach wie vor der Trinkwasserversorgung dient, irreversibel zu beschädigen.

Obwohl in vielen Fällen die Kombination von Ultraschallverfahren mit anderen Techniken (aus betrieblicher Sicht) empfohlen werden kann, um deren Wirkung zu verstärken, ist hier die spezifische Wirkung der Ultraschall-Brunnensanierung stattdessen für den MO-4 Vlastislav-Brunnen untersucht werden. Zur Bewertung der Auswirkungen wurden alle verfügbaren Methoden eingesetzt: visuelle, hydrodynamische und geophysikalische.

Im März 2021 wurde der Brunnen MO-4 einer komplexen mechanischen Sanierung unterzogen.

Die ersten visuellen Inspektionen und geophysikalischen Bohrlochmessungen (die vor der eigentlichen Sanierung durchgeführt wurden) zeigten den schlechten Zustand der Bohrlochverrohrung und Einsturzgefahr. Bürstenreinigungs- und Hochdruckwasserstrahlverfahren wurden aus dem Zeitplan gestrichen. Nach dem anfänglichen Airlift-Pumpen der gestrandeten Sedimentablagerungen wurde das experimentelle Ultraschallverfahren mit einer Prototypsonde durchgeführt, die von der SONIC TECHNOLOGIES, GmbH (Sailauf, Deutschland), bestehend aus drei magnetostriktiven Wandlern mit einer Frequenz von 20 kHz und einer Gesamtleistung von 7,5 kW sowie dem gleichzeitigen Betrieb einer Tauchpumpe. Die Sanierungsanlage ist in Abbildung 7 dargestellt.

Schließlich wurde eine zweite Lufthebepumpe eingesetzt, um die restlichen Sedimente und die durch Ultraschall induzierten Ablagerungen zu entfernen. Ein Vergleich der Bedingungen im Inneren des Brunnens vor und nach der Sanierung in verschiedenen Tiefen ist in Abbildung 8 dargestellt. Eine 3Dgeo-Farbkamera im PAL-Format Immersionskamera mit einer Auflösung von 750 × 600 (96 dpi) wurde verwendet, um Bilder der Baustelle aufzunehmen.



Abbildung 7. Im Rahmen des Projekts gebautes Sanierungsset.

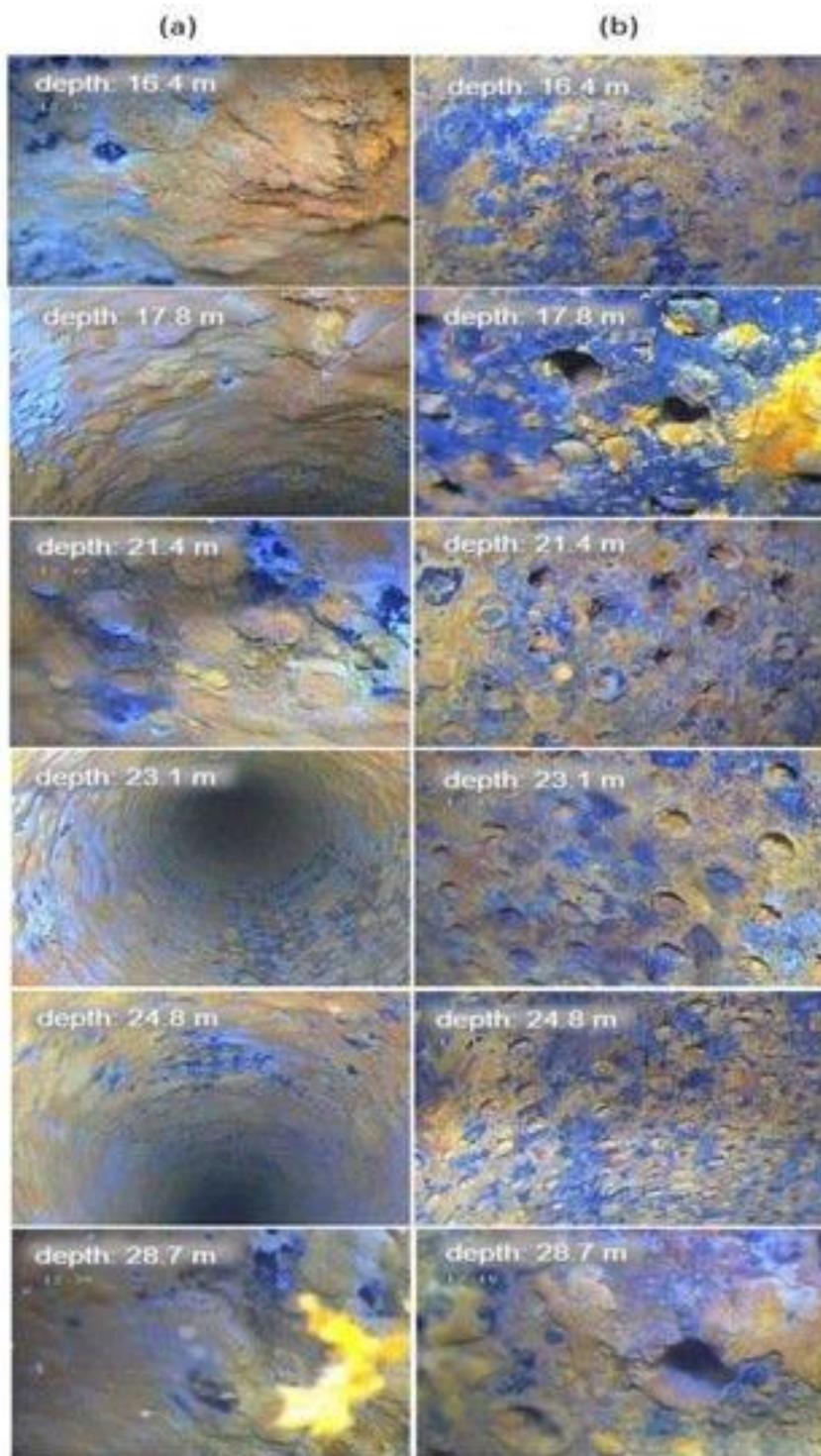


Abbildung 8. Beispiel einer Kamerainspektion des Inneren von Brunnen MO-4 in verschiedenen Tiefen vor (a) und nach (b) der Sanierung.

### 3.5. Bohrlochvermessung

Vor und nach der Ultraschallsanierung wurde eine Reihe von vergleichenden geophysikalischen Methoden der geophysikalischen Bohrlochvermessung angewandt. Die Messungen wurden von SG GEOTECHNIKA, a.s. (Geologická 988/4, 152 00 Praha 5-Hlubočepy, Tschechische Republik) durchgeführt, und das Ziel des Verfahrens war es vor allem, den aktuellen technischen Zustand des Bohrlochs und dessen Funktionalität nach der Sanierung zu überprüfen. Die vorgesehenen Messungen:

- Die Verifizierung des technischen Zustands des Bohrlochs (innere, äußere Ausstattung, Durchmesser, Perforationen, Tiefe).
- Die Verifizierung des Bohrlochinnenraums durch optische Inspektion;
- die Bestimmung der Wasserzuflüsse und ihrer relativen Ergiebigkeit sowie die Klärung der Grundwasserverhältnisse

### 3.6. Die Inspektion des Brunnenkiesfilters

Zu den angewandten Methoden gehören:

- Gamma-Logging;
- Neutronen-Neutronen-Messung;
- Gamma-Gamma-Logging bei der Dichtemessung (Density Logging) - vor allem zum Aufspüren von offene Räume außerhalb des Bohrlochgehäuses;
- Kavernometrie - zur Überprüfung des Innendurchmessers des Bohrlochrohrs, möglicher Abweichungen (Rohrbrüche, Auswüchse), Rohrverbindungen usw.;
- Messung der physikochemischen Eigenschaften des Wassers (Leitfähigkeit, Temperatur, Prozentsatz des gelösten Sauerstoffs, pH-Index, Oxidations-Reduktions-Potential), um mögliche Zonalität des Wassers im Bohrloch (aus verschiedenen Tiefen);
- Resistivimetrie bei der Anwendung der Methode der markierten Flüssigkeitsverdünnung zur Klärung des Grundwassers und zum Nachweis von Inflows;
- Resistivimetrie bei der Anwendung der markierten Flüssigkeits-Pump-Methode zur Bestimmung aller Einleitungen und deren Ergiebigkeit.

Die gemessenen Parameter wurden mit den Bedingungen vor der Sanierung verglichen: Wasserphysikalische und chemische Eigenschaften des Wassers, Wasserzufluss, Ausbeute der durchlässigen Stellen, Brunnenfilter, Dichte, Neutroneneigenschaften der Bohrlochverrohrung, natürliche Gammaaktivität und die Bohrlochdurchmesserkurve (Kavernenmessung). Die Ergebnisse wurden zu den folgenden Schlussfolgerungen interpretiert:

Die Entfernung von Sedimenten von der Bohrlochsohle erhöhte die verfügbare Tiefe von ursprünglich 36,0 m auf jetzt 36,5 m, das sind 0,5 m mehr als die angegebene Bohrlochtiefe.

Der Vergleich der Neutronenloggerkurven zeigte eine leichte Verringerung des Signals im 11-17 m unter Gelände (b.t.) (größerer Wasseranteil im Vergleich zu Ton).

Suspension). Im Abschnitt von 7,35-10,32 m ü. NN war der Unterschied signifikant; dies war jedoch wurde jedoch durch einen saisonalen Anstieg des Grundwasserspiegels beeinflusst. Der ursprünglich trockene Abschnitt ist jetzt befeuchtet; daher gab es in diesem Abschnitt eine signifikante Verringerung des Signals auf der Neutronenmesskurve

Kurve in diesem Abschnitt.

Was die Veränderungen der natürlichen Gamma-Aktivität betrifft, so wurde eine gewisse Verringerung in fast das gesamte Bohrloch. Dies deutet darauf hin, dass die Verrohrung von der Tonsuspension befreit wurde.

Suspension.

Ein Vergleich der Gammakurven vor und nach der Sanierung zeigte deutlich eine Dichteabnahme im Abschnitt 11-23 m (dem Abschnitt mit den Hauptzuflüssen).

Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass der Brunnenkiesfilter von Verstopfungen befreit wurde (Wasser im Kiesfilter hat eine geringere Dichte als die Tonsuspension, die die Poren des Filters verstopft).

Von den überwachten Parametern hat sich der pH-Wert praktisch nicht verändert. Seine Tiefe und Verlauf und Werte waren vor und nach der Sanierung fast identisch (6,9-7,9 m). Die Werte des Oxidations-Reduktionspotenzials sind gestiegen. Es erreicht nun positive Werte über den gesamten Abschnitt bis zum Ende des Bohrlochschirms bei 32 m. Dies hängt wahrscheinlich mit der Wiederherstellung der vertikalen Strömung im Bohrloch zusammen. In dem Abschnitt mit Vollverrohrung gab es einen starken Abfall auf leicht negative Werte. Die Wassertemperatur an der Sohle war ähnlich wie vor der Sanierung. Im nächsten Abschnitt des Bohrlochs war sie jedoch etwas höher des Bohrlochs, und zwar um bis zu 0,3° C, was ebenfalls mit der Wiederherstellung des Abflusses zusammenhängen kann. Die kleine Anomalie auf der Temperaturkurve (und auf der Leitfähigkeitskurve) ist ein Indikator signifikanten Zuflusses. Die Leitfähigkeit des Wassers war bereits vor der Sanierung recht hoch.

Sanierung: 1070-1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Wasser mit längerer Verweilzeit im Gestein).

Möglicherweise haben Sulfate zur verstärkten Mineralisierung in diesem Gebiet beigetragen. Ähnliche Werte traten am Grundwasserspiegel auf, während in einem anderen Teil des Brunnens die Leitfähigkeit sogar noch höher war und Werte bis zu 1400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  erreichte. Diese Veränderung stand auch im Zusammenhang mit der Rückgewinnung von dem natürlichen Grundwasserabfluss. Die relative Signifikanz des Grundwassersickerwassers wurde gesenkt, was tendenziell zu einer geringeren Leitfähigkeit führte.

Die Hydrodynamik des natürlichen Grundwassers im Bohrloch hat sich deutlich verändert. In einer Tiefe von 11,95-12,3 m ist ein neuer signifikanter Zufluss entstanden.

Wasser tritt nun in das Bohrloch in einer Tiefe von 11,95-12,3 m ein und fließt nach unten. Wasser wird zugeführt aus der Sandsteinschicht in einer Tiefe von 17,5-18,0 m (dieser Zufluss wurde auch in der ersten Messung vor der Bergung). Während das Wasser weiter abwärts fließt, wird Wasser aus einem Nebenfluss bei 20,2-21,0 m (oberer Teil der grobkörnigen Sandsteinschicht unterhalb der Schluffsteinschicht mit Tonversiegelung - ebenfalls ein Zufluss, der bereits bei der ersten Messung).

Wasser aus allen drei Zuflüssen fließt durch das Bohrloch nach unten mit einem Ertrag von  $Q = 7400 \text{ L}/\text{Tag}$ . Das sind fast 2000  $\text{l}/\text{Tag}$  mehr als beim Abfluss vor der Brunnensanierung. Das Grundwasser tritt aus dem Brunnen in eine Schicht aus schluffigem Ton in einer Tiefe von 29,2-29,7 m, mit einem leichten Rückstand am Ende der Perforation in einer Tiefe von 32 m.

Um die Zuflüsse zu überprüfen und ihre relative Ergiebigkeit zu bestimmen, wurde im Brunnen eine markierte Flüssigkeitsabgabe Pumpverfahren durchgeführt. Das Wasser wurde 1,5 Stunden lang aus einer Tiefe von 9 m gepumpt mit einer konstanten Fördermenge von  $Q = 0,50 \text{ L}/\text{s}$ . Der Wasserspiegel sank um  $s = 0,51 \text{ m}$  und erreichte einen stationären Zustand. Eine überschlägige Berechnung ergab eine Erhöhung des spezifischen Ertrags von etwa 20 % bei einer Pumprate von  $Q = 0,5 \text{ L}/\text{s}$ . Der neue Zufluss in einer Tiefe von 19,95-12,3 m trägt zweifelsohne zur Erhöhung der spezifischen Ausbeute bei. Die durchlässigen Stellen, die bereits bei der Beobachtung des natürlichen Abflusses mit dem markierten Flüssigkeitsverdünnungsmethode ersichtlich waren, konnten bestätigt werden. Der Hauptzustrom scheint aus dem Sandstein zu kommen Sandstein in einer Tiefe von 17,5-18,0 m. Dies entspricht etwa 50 % der Gesamtausbeute des Bohrlochs.

Der Zufluss in 20,2-21,0 m Tiefe macht etwa 15 % der gesamten der Gesamtausbeute des Bohrlochs bei, und der Zufluss in 29,2-29,7 m Tiefe trägt 5 % bei. Die neu entdeckte inflow in 11,95-12,3 m Tiefe ist mit einem Anteil von 30 % an der Gesamtausbeute des Bohrlochs recht bedeutsam.

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass der natürliche vertikale Wasserfluss lediglich ein Überfluss zwischen durchlässigen Stellen ist. Es handelt sich nicht um eine Verbindung von Grundwasserleitern mit unterschiedlichen Abflüssen (sog. hydraulischer Kurzschluss), denn bei einer Absenkung des Pumpenniveaus um 0,51 m abgesenkt würde, würde sich die Richtung

der Wasserbewegung umkehren und Wasser aus allen Nebenflüsse in Richtung der Pumpe fließen würde.

Der neue Zufluss von 11,95-12,3 m ist für den Brunnen von Vorteil; er befindet sich in einer Tiefe, in der sich die Verrohrung und die Wassereigenschaften dieses Zuflusses nicht sehr von denen der anderen Bohrungen.

Ausgehend von einem visuellen Vergleich der Ergebnisse der Tauchkamerainspektion der Brunnenverrohrung (Abbildung 8) vor und nach der Sanierung lässt sich feststellen, dass eine Verringerung der mineralischen Verkrustungen im gesamten Bereich des Brunnenschirms, d. h. überall dort, wo die Ultraschallmethode angewandt wurde. Es wird geschätzt (aus einer Kamerabefahrung des Bohrlochs), dass etwa 70-80 % der Perforationslöcher wieder geöffnet worden sind, obwohl ein Teil der Verkrustungen zurückgeblieben ist und daher noch eine teilweise Einschränkung des Grundwasserzuflusses zum Bohrloch. Der größte Unterschied wurde bei 16-20 m unter der Erdoberfläche festgestellt, wo (aufgrund der Lage des Hauptgrundwasserzuflusses) die mineralischen Verkrustungen ihre größte Mächtigkeit erreichten und wo die geophysikalische Bohrlochmessung eine signifikante Einstromerholung sowie eine Abnahme der Dichte der Kiesschüttung des Brunnens zeigte.

Dichte der Kiesschüttung. Es wurden Korrosionslöcher in den Profile der Bohrlochverrohrung sowie der Verbindung einiger einzelner Perforationen.

Wir verglichen auch die Trübung des gepumpten Wassers vor und nach dem Beginn der Ultraschallsanierung (Abbildung 9)

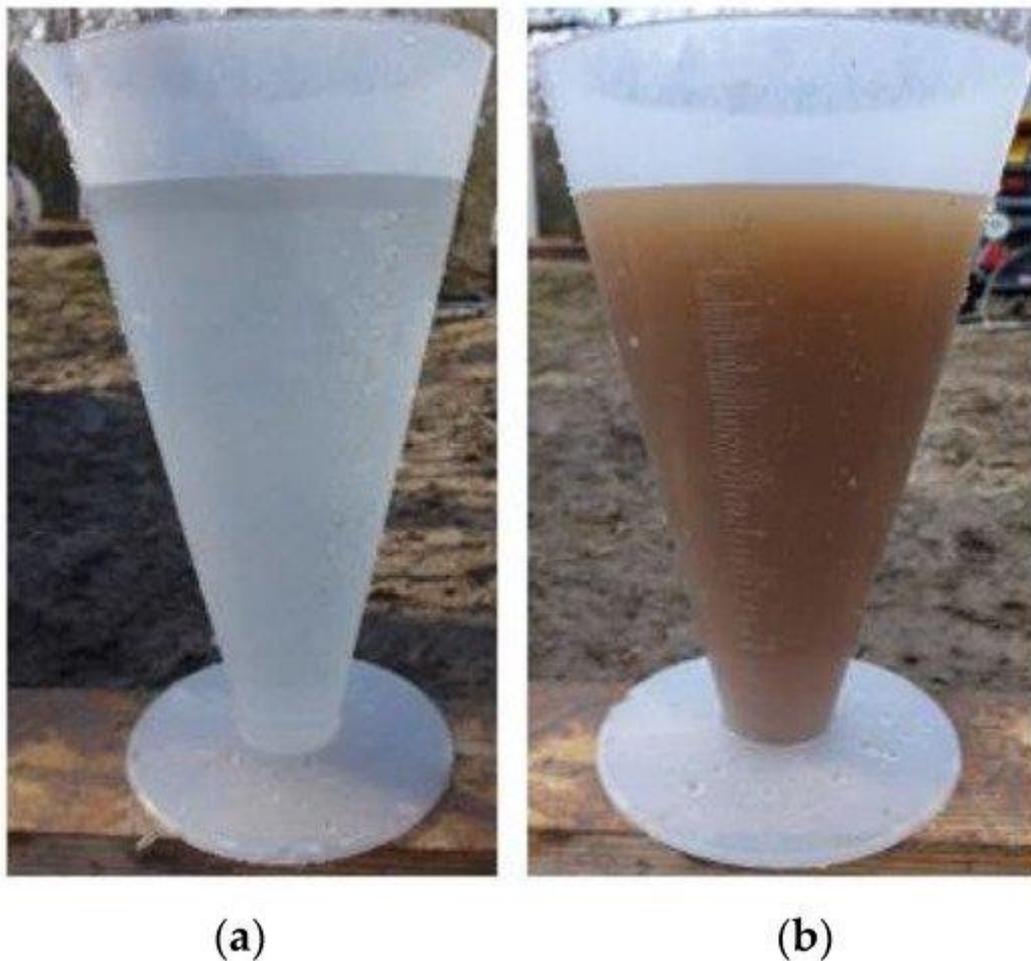


Abbildung 9. Vergleich der Trübung des Rohwassers vor (a) und nach dem Beginn (b) der Ultraschallsanierung

Am Brunnen MO-4 wurden vor und nach der Sanierung Pumpversuche durchgeführt (Tabelle 2 und Abbildung 10).

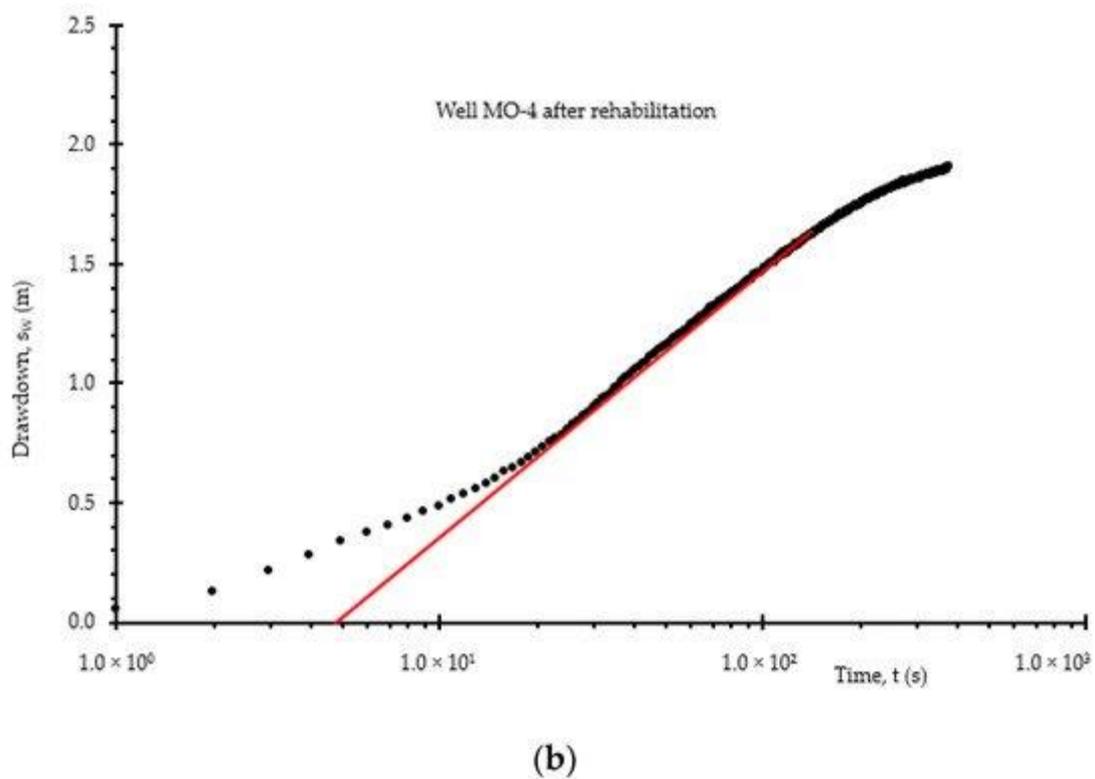
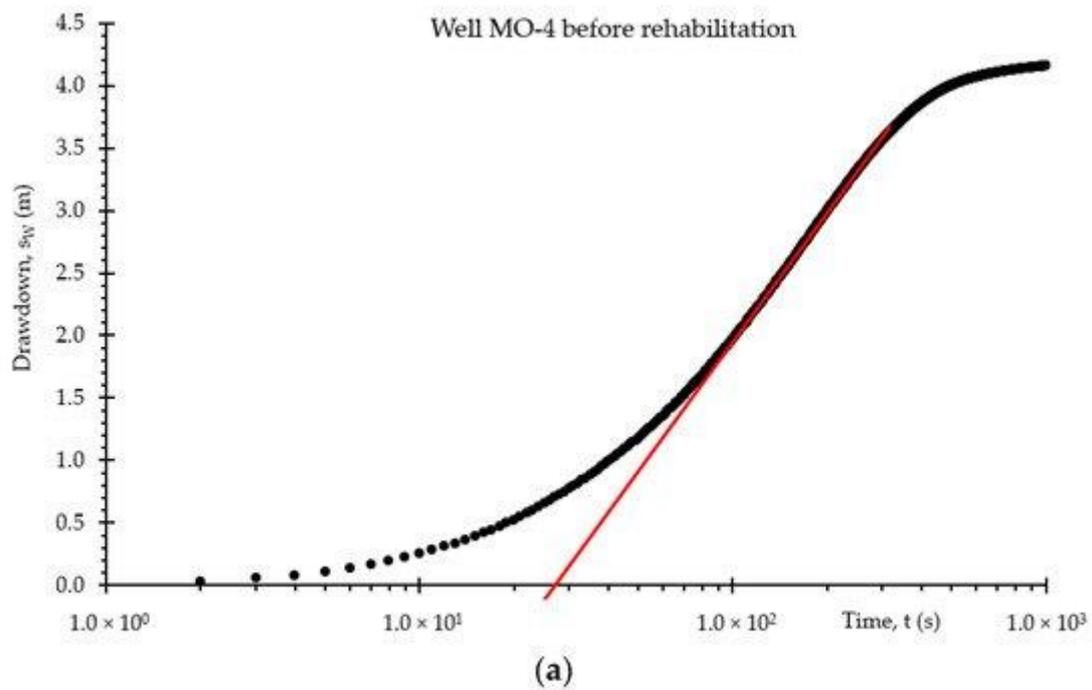


Abbildung 10. Pumpversuche am Brunnen MO-4 vor (a) und nach (b) der Sanierung (für den frühen Teil des Pumpversuchs wird die rote Gerade in der Software [50] zur Auswertung des Skin-Faktors verwendet).

Tabelle 2. Parameter der Pumpversuche vor und nach der Sanierung.

	Q (m <sup>3</sup> /s)	Dauer des Pumpversuchs (s)	max sw (m)
Vor der Regenerierung	0,0023	1500	4,2
Nach der Regenerierung	0,0014	1250	2,05

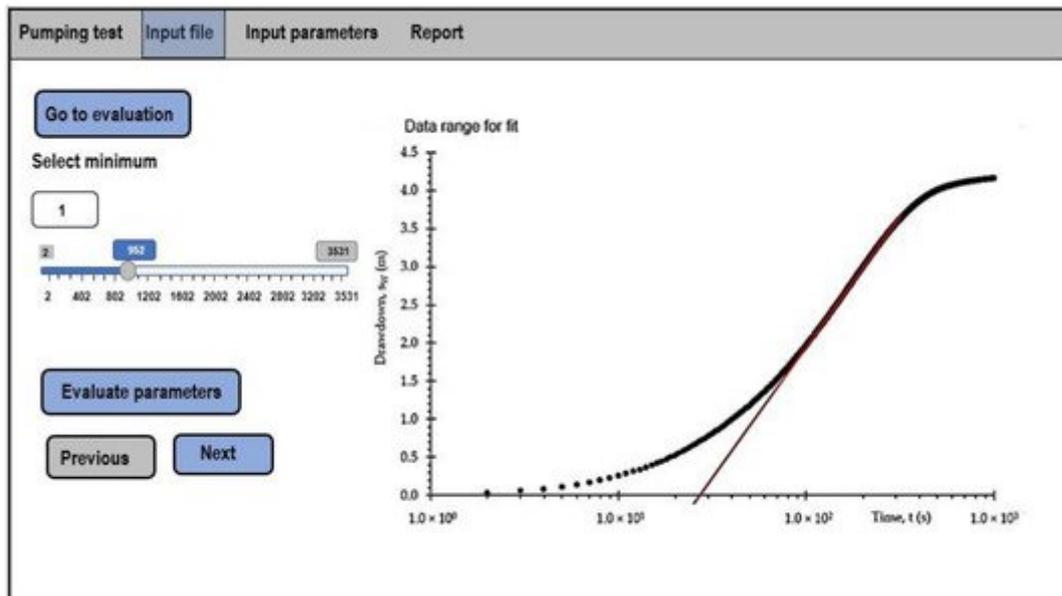


Abbildung 10 zeigt eine semilogarithmische Darstellung der Reduktion im Vergleich zum Logarithmus der Zeit.

Zur Bestimmung der Größe des Skineffekts wurde die Software Dtest\_ULTRA [50] verwendet. Diese Software ist kostenlos und unterliegt einer GPLv3-Lizenz (die Software kann von dieser Adresse heruntergeladen werden: <https://github.com/ficaj/pumping-test> (Zugriff am 23. August 2021)). Die Software verwendet die oben beschriebene Berechnungsmethode, indem sie den Skin-Faktor aus dem ersten Abschnitt des Pumptests auswertet. Auf diese Weise ist die Software in der Lage, die Gleichung für die Linie zu finden, die den ersten Linienabschnitt darstellt (siehe Abbildung 11). Bei ungewöhnlichen Brunnen kann der Benutzer die Position der Geraden für das erste Liniensegment (rote Linie) manuell einstellen, indem er einen Punkt auf dem Schieberegler verschiebt (siehe Abbildung 11). Die Software ist auch in der Lage, die Reichweite des Absenkungskegels sowie die Transmissivität und die hydraulische Leitfähigkeit des Aquifers zu bewerten. Nachdem die entsprechenden Berechnungen abgeschlossen sind, kann der Benutzer alle Ergebnisse direkt im Programm einsehen. Das erstellte Projekt kann dann gespeichert werden, so dass der Benutzer beim nächsten Einschalten der Anwendung mit dem Projekt weiterarbeiten kann. Die Software ist in der Lage, einen Abschlussbericht zu erstellen (siehe Abb. 12 und Abb. 13); der Benutzer kann auswählen, welche Diagramme letztendlich in den Bericht aufgenommen werden sollen. Dieser Bericht kann entweder im .docx- oder im .html-Format erstellt werden.

Abbildung 11. Demonstration der Dtest\_ULTRA-Software.

Pumping test Input file Input parameters **Report**

**Report options**  
 Include  
 Graph – input data  
 Graph – data used  
 Graph – fitted values

Enter well location

Enter well depth

Output documents format  
 PDF  HTML  WORD

**Skin effect evaluation - report**  
 Evaluated on 09 July 2021  
 Name of the well: **MO-4 before 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 **0.0023 m<sup>3</sup>/s**. The well parameters are shown in Table 1 and aquifer parameters in table 2.

	Value	Units
Well radius	0.150	[m]
Wellbore storage	1437.360	[-]
Depth of well	36.00	[m]
Skin factor, SF	16.8514	[-]
s_skin	2.4096	[m]

	Value	Units
Transmissivity	0.002560	[m <sup>2</sup> /s]
Storativity	0.000529	[-]

Abbildung 12. Abschlussbericht für Bohrloch MO-4 vor der Sanierung.

Pumping test Input file Input parameters **Report**

**Report options**  
 Include  
 Graph – input data  
 Graph – data used  
 Graph – fitted values

Enter well location

Enter well depth

Output documents 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 m<sup>3</sup>/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 <sup>2</sup> /s]
Storativity	0.000529	[-]

Abbildung 13. Abschlussbericht für das Bohrloch MO-4 nach der Sanierung.

#### 4. Erörterungen

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Bewertung der Feldsanierung des Demonstrationsbrunnens MO-4 in Vlastislav (Tschechische Republik) unter Verwendung des entwickelten Ultraschallgeräts. Der Skin-Faktor SF wurde mit der Software Dtest\_ULTRA [50] ermittelt.

	Q (m <sup>3</sup> /s)	Skin Faktor (-)	S <sub>w</sub> (m)	S skin (m)	Spezifische Entnahme (m <sup>3</sup> /s/m)
Vor Rehabilitation	0,0023	16,85	4,2	2,41	5,5 *10 <sup>-4</sup>
Nach Rehabilitation	0,0014	12,7	2,05	1,1	6,83*10 <sup>-4</sup>
Differenz		4,15	2,15	1,31	1,33*10 <sup>-4</sup>
Verbesserung (%)		24,63	51,2	54,36	24,18

Tabelle 3. Bewertung der Sanierung des Brunnens MO-4.

Tabelle 3 zeigt die Erfolgsquote der Sanierung. Der Skin-Faktor verringerte sich um 4,15 m, und die Gesamtabenkung nach dem Sanierungseingriff war um 2,15 m geringer.

Die Sanierung des Brunnens MO-4 in Vlastislav mit dem Ultraschallverfahren war in Bezug auf alle überwachten Parameter erfolgreich. Die visuelle Inspektion bestätigte die Entfernung von 2,5 m dicken Bodensedimenten und eine verbesserte Öffnung der Perforationslöcher im Brunnensieb (schätzungsweise 70-80 %). Die hydrodynamischen Tests ergaben eine Verringerung des Skineffekts um 24,63 %, eine Verringerung der Absenkung durch zusätzliche Widerstände um 51,2 % und einen Anstieg des spezifischen Abflusses um 24,18 %. Die geophysikalischen Bohrlochmessungen ergaben, dass nach der Sanierung ein neuer Grundwasserzufluss in den Bohrlochbereich eröffnet wurde und die Dichte der Brunnenverrohrung abnahm.

Eine Reihe von bohrlochgeophysikalischen Messverfahren wurde sowohl vor als auch nach der Sanierung angewandt (siehe Abbildung 14). Die geophysikalische Gamma-Bohrlochmethode ergab eine Abnahme der Dichte des Verrohrungsraumes in einer Tiefe von etwa 11-23 m, was als Freilegung des kragenförmigen Teils der Bohrlochverrohrung hinter dem perforierten Abschnitt interpretiert werden kann. Die Resistivimetrie-Methode zeigte ebenfalls eine signifikante Erholung des Zuflusses bei 12-13 m an [62].

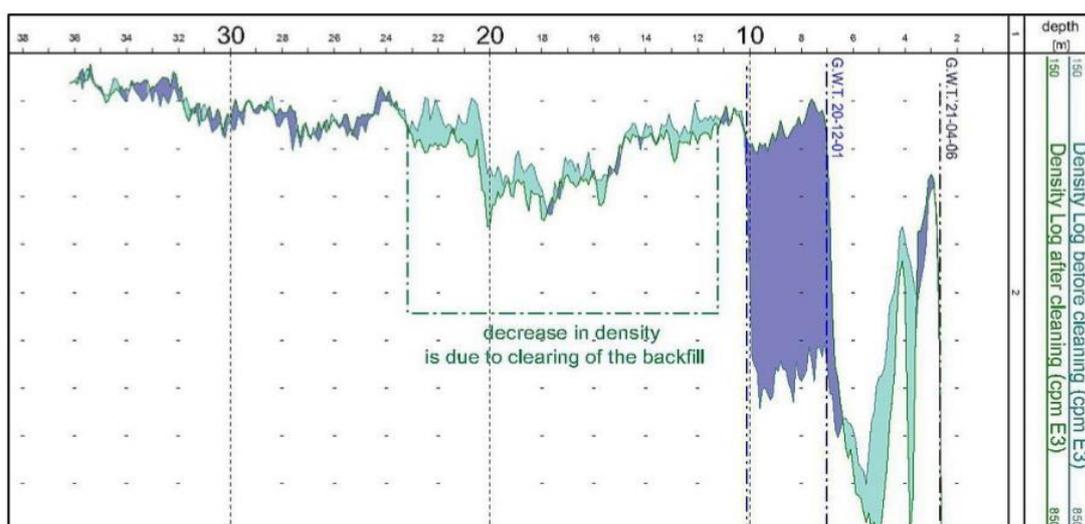


Abbildung 14. Protokoll der Kiesschüttungsdichte vor und nach der Ultraschallsanierung des Brunnens MO-4.

Die Anwendung von Ultraschall bei der mechanischen Sanierung des Brunnens MO-4 erwies sich als wirksam; frühere Experimente haben jedoch gezeigt, dass eine gleichzeitige Wasserentnahme während der Anwendung von Ultraschall erforderlich ist. Dies scheint darauf zurückzuführen zu sein, dass die Wirkung des Ultraschalls mineralische Ablagerungen in Form von Feinsedimenten freisetzt, die den Bereich der Brunnenverrohrung ohne gründliche Entfernung wieder verstopfen können. Aus diesem Grund scheint es nicht sinnvoll zu sein, nur die Ultraschallwirkung zu nutzen [63]. Es stellt sich auch die Frage nach der richtigen Reihenfolge bei der Kombination der eingesetzten Sanierungstechniken. Die grundlegenden mechanischen Verfahren eröffnen im Prinzip Raum für den gezielten Einsatz der Ultraschallmethode, doch hängt dies von der Art der Verstopfungsschicht (im Fall des Brunnens MO-4 handelte es sich in erster Linie um eine harte mineralische Verkrustung), dem Material und dem technischen Zustand der Brunnenrüstung ab. Die Anwendung von Ultraschall selbst führt zu einer weiteren Ablagerung von Sedimenten an der Bohrlochsohle, so dass es sinnvoll erscheint, z. B. das Lufthebepumpen vor und nach der Ultraschallphase zu wiederholen [1,64,65]. Nicht zuletzt ist nicht ganz klar, inwieweit die mechanische Wirkung dieser Methode erreicht werden kann und wie lange sie auf diese Weise wirksam sein kann (insbesondere im Vergleich zu anderen Methoden) [7].

Geschätzte Kosten der MO-4-Regenerierung: Es handelte sich um eine experimentelle Brunnenanierung, aber die Kosten können auf ca. USD 5,00 geschätzt werden, ohne die diagnostischen Arbeiten (Kamerainspektion, Pumpversuche und geophysikalische Messungen). Die Gesamtkosten würden sich dann auf etwa 5800 USD belaufen.

Die Forschung in diesem Bereich wird fortgesetzt - das Forschungsteam hat ein EUREKA-USOR-Forschungsprojekt initiiert.

## 5. Schlussfolgerungen

Im Vergleich zu anderen gängigen Sanierungsverfahren (Tabelle 4) ist die Ultraschallmethode besonders wirksam bei der Verringerung harter mineralischer Verkrustungen, und ihre Hauptwirkung erstreckt sich über die Brunnenverkleidung hinaus auf den Bereich der Kiesfilterpackung, die ebenfalls nur durch chemische Verfahren erreicht wird, allerdings um den Preis einer gefährlichen Handhabung und der Entstehung giftiger Abwässer, deren Beseitigung in der Regel länger dauert als die Sanierung selbst. Nach dem Einsatz des Ultraschallverfahrens (wie auch anderer mechanischer Verfahren) kann der Förderbrunnen sofort in Betrieb genommen werden. Das Ultraschallverfahren kann jedoch nicht allein angewandt werden, sondern nur in Kombination mit dem Pump- (oder Lufthebe-) Verfahren, das hier zur Beseitigung des durch den Ultraschalleinschlag freigesetzten Materials selbst eingesetzt wird. Bei einer großen Anzahl von mineralischen oder organischen Verkrustungen in der Brunnenverrohrung oder am Boden des Brunnens ist es vorteilhaft, das Ultraschallverfahren mit einem der Hochdruckverfahren (Hydrojet...usw.) zu kombinieren, die eine stärkere makroskopische Wirkung auf einige Arten von Ausfällungen haben. Die Entscheidung über die Wahl der angewandten Sanierungstechniken muss speziell auf der Grundlage der verfügbaren Informationen und nach einer Bewertung des aktuellen technischen Zustands des betreffenden Brunnens getroffen werden. Zu den repräsentativsten Ergebnissen der experimentellen Brunnenanierung mittels Ultraschall gehören die Verringerung der zusätzlichen Widerstände und die Erhöhung der spezifischen Ergiebigkeit, die mit einer nachweisbaren Verringerung der Dichte im Filterbereich des Brunnens einhergehen.

	Wirkung					Arbeitsweise
	Sumpf	Vollrohr	Filter	Toxische Produkte	Vorteil	Nachteil
Physikalische Methoden						
Air-Lifting/Pumpen	Ja	begrenzt	begrenzt	nein	einfach	Geringe Eindringtiefe, geringer Effekt
Bürsten	nein	begrenzt	nein	nein	einfach	Geringer Effekt, Beschädigungen möglich
Wasser-Hochdruck	nein	ja	begrenzt	nein	wirksam	Teuer, Beschädigungen möglich
Gas-Hochdruck (Hydropuls)	nein	ja	begrenzt	nein	wirksam	Komplex, teuer, Beschädigungen möglich
Ultraschall	nein	ja	ja	nein	Wirksam, materialfreundlich	Komplex
Chemische Methoden						
Säure	ja	ja	ja	ja	wirksam	Gefährlich, es entstehen giftige Abwässer
Oxydantien	beschränkt	ja	beschränkt	ja	billig	Gefährlich, es entstehen giftige Abwässer

Tabelle 4. Vor- und Nachteile der "ULTRA"-Lösung im Vergleich zu anderen Lösungen.

Ähnliche Effekte, die an drei anderen Brunnen in der Tschechischen Republik durch den versuchsweisen Einsatz der Ultraschallregenerierung erzielt wurden, finden Sie unter [home.czu.cz/pech](http://home.czu.cz/pech) (Zugriff am 23. August 2021) (in Tschechisch).

Die Ultraschallmethode ist eine geeignete Ergänzung des Spektrums der Möglichkeiten zur Brunnensanierung, nicht nur für Förderbrunnen, sondern auch für Injektionsbrunnen. Die Sanierung von Brunnen mit Ultraschall hat eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Methoden. Ihre Wirksamkeit liegt jedoch vor allem in der Fähigkeit, Verstopfungen anorganischen und organischen Ursprungs im Raum hinter der Verrohrung und außerhalb des Brunnengehäuses abzubauen. Diese Methode erfordert weder die Anwendung chemischer Substanzen noch verursacht sie chemische Reaktionen, was sie nicht nur umweltfreundlich macht, sondern auch die Vorbereitungszeit für die Sanierungsarbeiten verkürzt (im Vergleich zu chemischen Methoden); außerdem kann die Ultraschallbehandlung ohne Genehmigung der Wasserbehörden oder anderer staatlicher Verwaltungsstellen durchgeführt werden. Die Ultraschallmethode ist auch zerstörungsfrei für die Baumaterialien der Einlaufbauwerke. Darüber hinaus wurde bereits früher gezeigt [21,39], dass Ultraschall unabhängig vom verwendeten Material (z.B. PVC, PE, Keramik, Holz, Stahl, Kupfer, harzgebundene Kiessiebe oder Spiraldraht) keine negativen Auswirkungen auf die Brunnenausrüstung hat. Diese Methode stellt keine Belastung für die Brunnenausrüstung, die Verrohrung oder die Umgebung dar und verlängert so die Lebensdauer der Rückhalteobjekte. Die Wirkung des Ultraschalls ist unmittelbar und effektiv und kann die Zeit, die für die Durchführung von Bergungsmaßnahmen benötigt wird, erheblich reduzieren.

Im Rahmen des TAČR-Projekts TH02030421 ULTRA wurde schließlich ein voll funktionsfähiges Ultraschallgerät für die Sanierung von Pump- und Sickerbrunnen entwickelt. Diese Sanierungsanlage ist eigenständig, unabhängig von der Unterstützung durch andere Maschinen und Transporteinrichtungen und kann auch ohne einen vorhandenen Stromanschluss betrieben werden.

## Beiträge der Autoren

Konzeptualisierung, D.K. und P.P.; Methodik, D.K.; Software, V.F.; Validierung, D.K. und V.F.; Untersuchung, P.P.; Ressourcen, D.K.; Schreiben - Erstellung des ursprünglichen Entwurfs, V.F., D.K. und P.P.; Schreiben - Überprüfung und Bearbeitung, P.P., V.F., D.K. und H.P.; Projektverwaltung, P.P.

Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und ihr zugestimmt.

Finanzierung:

Diese Forschungsarbeit wurde von der Technologieagentur der Tschechischen Republik (Zuschussnummer TH02030421) im Rahmen des Projekts ULTRA - Technologie für die Sanierung von Pumpbrunnen auf der Grundlage von Ultraschallemissionen - finanziert.

## Referenzen

1. Abramova, A.V.; Abramov, V.O.; Bayazitov, V.M.; Nikonov, R.V. A method for water well regeneration based on shock waves and ultrasound. *Ultrason. Sonochem.* 2017, 36, 375-385. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Houben, G.J.; Weihe, U. Spatial Distribution of Incrustations around a Water Well after 38 Years of Use. *Ground Water* 2010, 48, 53-58. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
3. Mason, T.J.; Collings, A.; Sumel, A. Sonic and ultrasonic removal of chemical contaminants from soil in the laboratory and on a large scale. *Ultrason. Sonochem.* 2004, 11, 205-211. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
4. Izadifar, Z.; Babyn, P.; Chapman, D. Mechanical and Biological Effects of Ultrasound: A Review of Present Knowledge. *Ultrasound Med. Biol.* 2017, 43, 1085-1104. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
5. van Beek, C.G.E.M.; Breedveld, R.J.M.; Juhász-Holterman, M.; Oosterhof, A.; Stuyfzand, P.J. Cause and prevention of well bore clogging by particles. *Hydrogeol. J.* 2009, 17, 1877-1886. [Google Scholar] [CrossRef]
6. Mullakaev, M.S.; Abramov, V.O.; Abramova, A.V. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. *J. Pet. Sci. Eng.* 2015, 125, 201-208. [Google Scholar] [CrossRef]
7. Houben, G.; Treskatis, C. *Water Well Rehabilitation and Reconstruction*, 3rd ed.; McGraw Hill Professional: Two Penn Plaza, NY, USA, 2007; ISBN 0-07-148651-8. [Google Scholar]
8. Online verfügbar: [https://www.sonic-technologies.com/pdf/results\\_of\\_ultrasonic-well-rehabilitation.pdf](https://www.sonic-technologies.com/pdf/results_of_ultrasonic-well-rehabilitation.pdf) (Zugriff am 6. Juli 2021).
9. Mullakaev, M.S.; Abramov, V.O.; Abramova, A.V. Ultrasonic automated oil well complex and technology for enhancing marginal well productivity and heavy oil well recovery. *J. Pet. Sci. Eng.* 2017, 159, 1-7. [Google Scholar] [CrossRef]
10. Timmer, H.; Verdel, J.; Jongmans, A.G. Well clogging by particles in Dutch well fields. *J. Am. Water Work. Assoc.* 2003, 95, 112-118. [Google Scholar] [CrossRef]
11. Houben, G.J. Iron oxide incrustations in Wells-Part 1: Genese, Mineralogie und Geochemie. *Appl. Geochem.* 2003, 18, 927-939. [Google Scholar] [CrossRef]
12. Adebayo, A.R.; Bageri, B.S. A simple NMR methodology for evaluating filter cake properties and drilling fluid-induced formation damage. *J. Pet. Explor. Prod. Technol.* 2019, 9, 1643-1655. [Google Scholar] [CrossRef]
13. Bageri, B.S.; Al-Mutairi, S.H.; Mahmoud, M.A. Different techniques for characterizing the filter cake. *Soc. Pet. Eng.* 2013, 1. [Google Scholar] [CrossRef]
14. Iscan, A.G.; Kok, M.V.; Bagci, A.S. Permeability Reduction Due to Formation Damage by Drilling Fluids. *Energy Sources* 2007, 29, 851-859. [Google Scholar] [CrossRef]

15. Ralph, D.E.; Stevenson, J.M. The role of bacteria in well clogging. *Water Res.* 1995, 29, 365-369. [Google Scholar] [CrossRef]
16. Houben, G.J. Review: Hydraulics of water wells-head losses of individual components. *Hydrogeol. J.* 2015, 23, 1659-1675. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Zhu, P.; Song, Z.; Wu, X.; Xu, P.; Zhang, X.; Zhu, W. Community Distribution of Biofilms along a Vertical Wellbore in a Deep Injection Well during Petroleum Production. *Energie-Brennstoffe* 2021, 35, 1998-2005. [Google Scholar] [CrossRef]
18. Payne, F.; Quinnan, J.; Potter, S. *Remediation Hydraulics*; CRC Press: London, UK, 2008; S. 432. ISBN 978-0849372490. [Google Scholar]
19. Feng, F.; Mal, A.; Kabo, M.; Wang, J.C.; Bar-Cohen, Y. The mechanical and thermal effects of focused ultrasound in a model biological material. *J. Acoust. Soc. Am.* 2005, 117, 2347-2355. [Google Scholar] [CrossRef]
20. Mullakaev, M.S.; Abramov, V.O.; Abramova, A.V. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity wells. *J. Pet. Sci. Eng.* 2017, 158, 529-534. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Abramov, V.O.; Mullakaev, M.S.; Abramova, A.V.; Esipov, I.B.; Mason, T.J. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation. *Ultrason. Sonochem.* 2013, 20, 1289-1295. [Google Scholar] [CrossRef]
22. Abramov, V.O.; Abramova, A.V.; Bayazitov, V.M.; Marnosov, A.V.; Kuleshov, S.P.; Gerasin, A.S. Selective ultrasonic treatment of perforation zones in horizontal oil wells for water cut reduction. *Appl. Acoust.* 2016, 103, 214-220. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Mullakaev, M.S.; Abramov, O.V.; Abramov, V.O.; Gradov, O.; Pechkov, A.A. An ultrasonic technology for productivity restoration in low-flow boreholes. *Chem. Pet. Eng.* 2009, 45, 203-210. [Google Scholar] [CrossRef]
24. Abramov, V.O.; Abramova, A.V.; Bayazitov, V.M.; Altunina, L.K.; Gerasin, A.; Pashin, D.S.; Mason, T.J. Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. *Ultrason. Sonochem.* 2015, 25, 76-81. [Google Scholar] [CrossRef]
25. Mohsin, M.; Meribout, M. An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation. *Ultrason. Sonochem.* 2015, 23, 413-423. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
26. Hamida, T.; Babadagli, T. Analysis of capillary interaction and oil recovery under ultrasonic waves. *Transp. Porous Media* 2007, 70, 231-255. [Google Scholar] [CrossRef]
27. Petrauskas, A. Erhöhung der Effizienz der Regeneration von Wasserbrunnen mit Ultraschall durch die Verwendung von akustischen Wandlern, die aus Elementen in Biegeschwingungen bestehen. *Ultragarsas/Ultraschall* 2009, 64, 17-23. [Google Scholar]
28. Daghooghi-Mobarakeh, H.; Campbell, N.; Bertrand, W.K.; Kumar, P.G.; Tiwari, S.; Wang, L.; Wang, R.; Miner, M.; Phelan, P.E. Ultrasound-assisted regeneration of zeolite/water adsorption pair. *Ultrason. Sonochem.* 2020, 64, 105042. [Google Scholar] [CrossRef]
29. Aarts, A.C.T.; Gijs, O.; Bil, K.J.; Bot, E.T.G. Enhancement of Liquid Flow Through a Porous Medium by Ultrasonic Radiation. *SPE J.* 1999, 4, 321-327. [Google Scholar] [CrossRef]
30. Theis, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Trans. Am. Geophys. Union* 1935, 16, 519-524. [Google Scholar] [CrossRef]
31. Cooper, H.H.; Jacob, C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Trans. Am. Geophys. Union* 1946, 27, 526-534. [Google Scholar] [CrossRef]
32. Van Everdingen, A.F. The skin effect and its influence on the productive capacity of a well. *J. Pet. Technol.* 1953, 5, 171-176. [Google Scholar] [CrossRef]

33. Hurst, W. Etablierung des Skin-Effekts und seine Behinderung des Flüssigkeitsstroms in ein Bohrloch. *Pet. Eng.* 1953, 25, B6-B16. [Google Scholar]
34. Hawkins, M.F., Jr. Eine Anmerkung zum Skineffekt. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng.* 1956, 8, 356-357. [Google Scholar] [CrossRef]
35. Papadopoulos, I.S.; Cooper, H.H. Drawdown in a well of large diameter. *Water Resour. Res.* 1967, 3, 241-244. [Google Scholar] [CrossRef]
36. Ramey, H.H., Jr. Interpretation von Kurzzeit-Bohrlochtestdaten bei Vorhandensein von Skin-Effekt und Bohrlochspeicherung. *J. Pet. Technol.* 1970, 22, 97-104. [Google Scholar] [CrossRef]
37. Agarwal, R.G.; Al-Hussainy, R.; Ramey, H.J. An investigation of well storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment. *Soc. Pet. Eng. J.* 1970, 10, 279-291. [Google Scholar] [CrossRef]
38. Fan, Z.; Rarashar, R. Transient flow to a finite-radius well with well storage and skin effect in a poroelastic confined aquifer. *Adv. Water Resour.* 2020, 142, 103604. [Google Scholar] [CrossRef]
39. Patel, M.C.; Singh, A. Near Wellbore Damage and Types of Skin Depending on Mechanism of Damage. In *Proceedings of the Society of Petroleum Engineers SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*, Lafayette, LA, USA, 24-26 February 2016. [Google Scholar]
40. Liu, S. Load characteristics of high power sandwich piezoelectric ultrasound transducers. *Ultrasonics* 2005, 43, 365-373. [Google Scholar] [CrossRef]
41. Watlton, W.C. *Aquifer Test Modeling*, 1st ed.; CRC Press: Boca Ralton, FL, USA, 2007; S. 240. ISBN 978-1-4200-4292-4. [Google Scholar]
42. Batu, V. *Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1998. [Google Scholar]
43. Kresic, N. *Hydrogeology and Groundwater Modeling*, 2. Aufl.; CRC Press, Taylor and Francis: Boca Raton, FL, USA, 2007; ISBN 978-0849333484. [Google Scholar]
44. Bourdet, D.; Whittle, T.M.; Douglas, A.A.; Pirard, Y.M. A new set of type curves simplifies well test analysis. *World Oil* 1983, 196, 95-106. [Google Scholar] [CrossRef]
45. Novakowski, K.S. A Composite analytical model for analysis of pumping tests affected by weell bore storage and finite thickness skin. *Water Resour. Res.* 1989, 25, 1937-1946. [Google Scholar] [CrossRef]
46. Yeh, H.D.; Yang, S.Y.; Peng, H.Y. 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.* 2003, 26, 747-757. [Google Scholar] [CrossRef]
47. Van Everdingen, A.F.; Hurst, W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *J. Pet. Technol.* 1949, 1, 305-324. [Google Scholar] [CrossRef]
48. Stehfest, H. Algorithmus 368: Numerische Inversion von Laplace-Transformationen. *Commun. ACM* 1970, 13, 47-49. [Google Scholar] [CrossRef]
49. Holub, J.; Pech, P.; Kuraz, M.; Maca, P.; Kahuda, D. Evaluation of a pumping test with skin effect and well storage on a confined aquifer in the Bela Crkva, Serbia. *Int. J. Water* 2019, 13, 1-11. [Google Scholar] [CrossRef]
50. Ficaj, V.; Pech, P.; Kahuda, D. Software for Evaluating Pumping Tests on Real Wells. *Appl. Sci.* 2021, 11, 3182. [Google Scholar] [CrossRef]
51. Jüttnerová, S.; Bryjová, J. *Interaktives Lehrbuch der Ultrasonographie*. VŠB-TU, Ostrava. 2016. Online verfügbar: <http://www.jtarchitekt.cz/pdf/ultrasonografie.pdf> (Zugriff am 8. Juli 2021). (In Czech).

52. Zhang, Z.; Guo, J.; Liang, H.; Liu, Y. Numerical simulation of skin factors for perforated wells with crushed zone and drilling-fluid damage in tight gas reservoirs. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2021, 90, 103907. [Google Scholar] [CrossRef]
53. Sterrett, J.R. *Groundwater and Wells*, 3. Aufl.; Johnson screens-Weatherford comp: New Brighton, MN, USA, 2007; S. 812. ISBN 978-0-9787793-0-6. [Google Scholar]
54. Horne, R.N. *Modern Well Test Analysis: A Computer Aided Approach*, 4. Aufl.; Alto, P., Ed.; Petroway, Inc: Palo Alto, CA, USA, 1995; S. 185. ISBN 0-9626992-09.55. [Google Scholar]
55. Kahuda, D.; Pech, P. A new method for evaluation of well rehabilitation from the early-portion of the pumping test. *Water* 2020, 12, 744. [Google Scholar] [CrossRef]
56. Park, E.; Zhan, H.B. Hydraulics of a finite-diameter horizontal well with wellbore storage and skin effect. *Adv. Water Resour.* 2002, 25, 389-400. [Google Scholar] [CrossRef]
57. Chen, C.S.; Chang, C.C. Theoretical evaluation of non-uniform skin effect on aquifer response under constant rate pumping. *J. Hydrol.* 2006, 317, 190-201. [Google Scholar] [CrossRef]
58. Pasandi, M.; Samani, N.; Barry, D.A. Effect of well and finite thickness skin on flow to a partially penetrating well in a phreatic aquifer. *Adv. Water Resour.* 2008, 31, 383-398. [Google Scholar] [CrossRef]
59. Yeh, H.D.; Wang, C.T. A semianalytical solution for residual drawdown at a finite diameter well in a confined aquifer. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 2013, 49, 966-972. [Google Scholar] [CrossRef]
60. Sethi, R. 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.* 2011, 400, 187-194. [Google Scholar] [CrossRef]
61. Brunnensanierung mit hochenergetischem Ultraschall. *Sonic Umwelttechnik*. SONIC Information Nr. E1-09.2009. Online verfügbar: [www.sonic-umwelttechnik.de](http://www.sonic-umwelttechnik.de) (Zugriff am 8. Juli 2021).
62. Procházka, M. VLASTISLAV U TŘEBENIC, Zpráva o Revizním Karotážním Měření ve Vodárenském vrtu po Provedené Regeneraci, SG Geotechnika, a.s., Praha 2021. Online verfügbar: [Home.czu.cz/pech](http://Home.czu.cz/pech) (Zugriff am 5. Juli 2021). (Auf Tschechisch).
63. Zhang, G.J.; Wang, S.F.; Liu, Z.Z. Ultraschallregeneration von granulierter Aktivkohle. *Environ. Eng. Sci.* 2003, 20, 57-64. [Google Scholar] [CrossRef]
64. Gungor-Demirci, G.; Lee, J.; Keck, J.; Harrison, S.J.; Bates, G. Entwicklung eines risikobasierten Instruments für Entscheidungen über die Sanierung und den Austausch von Grundwasserbrunnen. *J. Water Supply Res. Technol. AQUA* 2019, 68, 411-419. [Google Scholar] [CrossRef]
65. Mansuy, N. *Water Well Rehabilitation*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017; S. 113-149. [Google Scholar] [CrossRef]
66. Anmerkung des Herausgebers: MDPI bleibt neutral in Bezug auf juristische Ansprüche in veröffentlichten Karten und institutionellen Zugehörigkeiten.

© 2021 by the authors. Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz. Dieser Artikel ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative-Commons-Attribution (CC BY)-Lizenz verbreitet wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).