

# Das Druckwellen-Impulsverfahren für die Regenerierung und Entwicklung von Brunnen



Dipl.-Ing.  
Christian Etschel,  
E + M BOHR-  
GMBH, Hof



Dipl.-Ing.  
Maik Schmidt,  
E + M BOHR UND  
BRUNNENBAU  
GMBH, Leipzig

Die Technologie, bei der durch Wasserhochdruck erzeugte Impulswellen zur Ablösung von Ablagerungen bzw. zur Mobilisierung abgesetzter Sand- und Kiesteilchen im Kiesringraum und angrenzenden Gebirge genutzt werden, wird im Entwurf des DVGW-Merkblattes W 130 als „Druckwellen-Impulsverfahren, Erzeugung durch Wasserhochdruck“ (im Folgenden abgekürzt mit DWI-W) bezeichnet. Das DWI-W hat sich sowohl bei der Regenerierung als auch bei der Entwicklung von Brunnen bewährt. In dem Beitrag wird das Verfahren anhand von aktuellen Untersuchungen und praktischen Beispielen ausführlich beschrieben.

## 1 Verfahrensbeschreibung 1.1 Physikalisches Wirkprinzip

Beim DWI-W wird die potenzielle Energie der Hochdruckpumpe (Druck) in kinetische Energie (Wasseraustrittsgeschwindigkeit) umgewandelt. Im Folgenden werden die wichtigsten physikalischen Effekte dieses sehr komplexen Verfahrens in ihrer Wirkung anschaulich beschrieben. Die technischen Parameter des E+M JET Masters® (Bild 1) sind die Ausgangsbedingungen für die nachfolgenden Ausführungen.

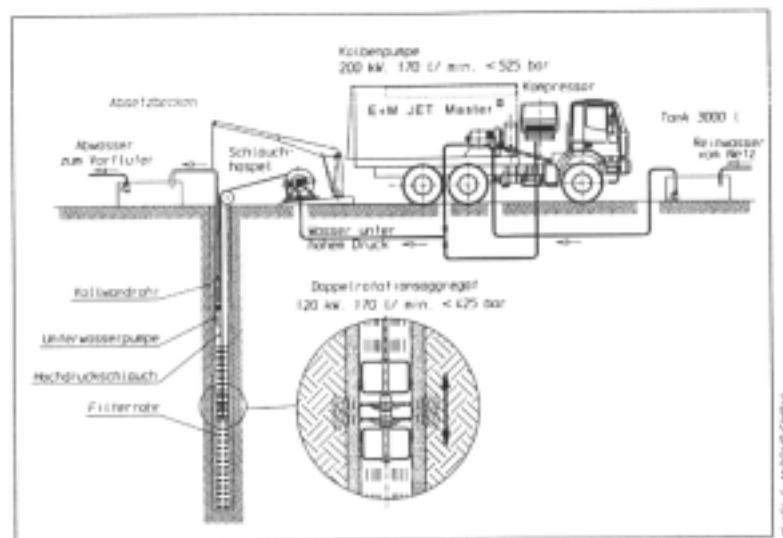


Bild 1: Technische Realisierung des Druckwellen-Impulsverfahrens erzeugt durch Wasserhochdruck: JET Master®

### 1.1.1 Tief wirkende Druckwellen

Die **kinetische Energie der Düsenstrahlen** führt durch Rückstoß zu einer gegenläufigen Rotationsbewegung von zwei Düsenkörpern bei sehr hohen Drehzahlen. Die extremen Wasseraustrittsgeschwindigkeiten von 180 m/s (650 km/h) und die Strahlkraft der einzelnen Düsen von ca. 190 N führen zu einer schlagartigen Beschleunigung des Wassers (Impulsen) in der Umgebung der Düsen und damit zur Initialisierung von **Druckwellen**, die sich durch die Brunnenverrohrung und die Filterkiesschüttung bis an die Bohrlochwand ausbreiten. Dieser hohe Energieeintrag erzeugt Mikrobewegungen der Ausbaumaterialien, die zur Zerkleinerung der vorhandenen Ablagerungen und zu einer Bewegung der einzelnen Kieskörner gegeneinander führen.

Diese Wirkung wird noch verstärkt durch:

- die eigentliche Drehbewegung der Düsenarme, da dieses „Durchpflügen“ des Wassers weitere Druckwellen auslöst
- die Pulsation des erzeugten Wasserstrahls infolge der Kolbenstöße der Drei-Plunger-Pumpe, die deutlich am Hochdruckschlauch spürbar sind
- die enorm hohen Drehzahlen von bis zu 10.000 U/min im Wasser. Sie führen zu sehr kurzen Verweilzeiten des Düsenstrahles an einem Punkt des Ausbaumaterials.

Als Ergebnis wird ein sehr **gleichmäßiges und flächendeckendes Reinigungsbild** erreicht (keine spiralförmigen „Waschspuren“).

Die Wirkung des DWI-W beruht also nicht auf der Erzeugung hoher Fließgeschwindigkeiten im Brunnen und im Kiesringraum, die die Scherkraft des Wassers zur Ablösung vorhandener Ablagerungen nutzt. Vielmehr ist die Erzeugung von **Impulsen, die Druckwellen auslösen**, die sich im Brunnen tief wirkend ausbreiten, die eigentliche Erklärung des Verfahrens.

### 1.1.2 Kolbeffekt

Ein zusätzlicher Aspekt ist, dass die sehr hohen Drehzahlen der beiden gegenläufig rotierenden Düsenpaare, die optimal an den Brunnendurchmesser angepasst werden müssen, zu einer fast vollständigen Trennung in zwei Wasserhorizonte im Brunnen führen. Durch die beim Reinigungsprozess gleichzeitig stattfindende **Auf- und Abbewegung** (Vorschub) des Reinigungsgerätes kommt es zu einem Kolbeffekt, der die Reinigungswirkung weiter erhöht. Das Doppelrotationsaggregat wird im Brunnen gleichmäßig bei einer frei einstellbaren Geschwindigkeit von 0,1 bis 0,3 m/s auf- und abgefahren. Dabei werden die hohen Fließgeschwindigkeiten genutzt, die durch die Druckdifferenzen des Wasserkolbens erzeugt werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass dieser Kolbeffekt und die damit verbundene Saugwirkung zu einem Stofftransport zum Brunnen führt.

### 1.1.3 Freispülvorgang

Um den Wirkungsgrad der Brunnenreinigung weiter zu erhöhen und um Kriterien über den Reinigungsfortschritt zu erhalten, wird während des Reinigungsprozesses eine Unterwasserpumpe in den Brunnen eingebaut, die kontinuierlich das anfallende Schmutzwasser abpumpt. Die Leistung der U-Pumpe muss unbedingt auf die Brunnencharakteristik abgestimmt werden, da bei zu geringer Fördermenge weniger gespannte Wasserhorizonte nicht mit aktiviert werden. Diese U-Pumpe erzeugt während der Reinigung eine **Strömung zum Brunnen**. Die durch die Impulswellen mobilisierten Kieskörner und die Schleppkraft der erzeugten Strömung zum Brunnen bewirken ein Freispülen der Porenkanäle von Ablagerungen und abgesetzten Sand- bzw. Kiesteilchen. Die Reinigungswirkung erhöht sich mit steigender Fließgeschwindigkeit zum Brunnen. Der Bereich der laminaren Strömung zu turbulenter Strömung darf allerdings nicht überschritten werden.

### 1.1.4 Projektierung

Bei der Planung möglicher Einsätze sind die physikalischen Kenngrößen des eingesetzten Regenerierungsverfahrens einschließlich ihrer Grenzwerte und Verluste unbedingt zu beachten. Wesentliche Kriterien, um die mögliche Wirksamkeit oder Unwirksamkeit vor Beginn einer Regenerierung zu beurteilen, sind:

- Druckverluste in Hochdruckschläuchen
- die wirksame Kernlänge des Düsenstrahles in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser
- Düsenstrahlgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand der Düse zur Rohrwand

Bei Beachtung solcher Gesetzmäßigkeiten kann der Erfolg einer Regenerierung mit der größtmöglichen Sicherheit garantiert werden. Genauso ist es dem ausführenden Unternehmen möglich zu erkennen, wann ein Einsatz erfolglos bleibt und es können alternative Maßnahmen eingesetzt werden.

## 1.2 Wissenschaftliche Untersuchungen

Um das Verständnis für das seit 1993 bei E + M eingesetzte Verfahren zu verbessern und um Fragen von Kunden über Vor- und Nachteile besser beantworten zu können, werden seit Einsatzbeginn des JET Masters<sup>®</sup> begleitende Untersuchungen und Testreihen durch das ausführende Unternehmen durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden mögliche Grenzbereiche für zukünftige Einsätze und maximal zu erzielende Wirksamkeiten ermittelt. Nur so war es möglich, zuverlässige und erfüllbare Aussagen über die Einsatzmöglichkeiten des DWI-W zu treffen.



Bild 2: Prüffeld beim Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V.

### 1.2.1 Variation der Drehzahl und Messung der Eindringtiefe

Es wurden im Zuge einer Diplomarbeit der Bergakademie Freiberg (SAAED, 1996) Versuche gefahren, deren Ziel die weitere Verbesserung der Reinigungsleistung und die Erhöhung der Eindringtiefe in den Kiesringraum war. Dabei hat man auf eine These Bezug genommen, die besagt, dass die Wirkung der Wasserstrahlen aus einer langsam drehenden Düse erheblich besser ist als die Wirkung bei einer schnell rotierenden Düse. Es wurden verschiedene Betriebszustände simuliert. Bei einer stark reduzierten Drehzahl von weniger als 100 U/min und ansonsten gleichen Ausgangszuständen (Düsendurchmesser, Düsenabstand, Druck und Wassermenge) hat sich gezeigt, dass die Reinigungswirkung erheblich schlechter war. Außer der Reinigung der Rohrrinnenwände konnte keine Wirkung im Kiesringraum nachgewiesen werden. Bei stehender Düse konnte die Tiefenwirkung durch die Filterschlitzte zwar deutlich verbessert werden (Eindringtiefen bis 0,6 m), der praktische Wert dieses Versuches geht aber gegen null, da die notwendige Zeit zur Reinigung eines Brunnens gegen unendlich geht. Weiterführende Versuche haben gezeigt, dass der stehende Wasserstrahl zu einem Abtragen von natürlichem Gebirge an der Bohrlochwand führt. Dieser Effekt, im Bergbau seit den 30er Jahren genutzt und Jet-Cutting genannt, verstopft die Porenkanäle im Kiesringraum und führt zu einer Umkehrung des eigentlich beabsichtigten Reinigungseffektes. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass die Gefahr der Beschädigung des Ausbaumaterials der Brunnen erheblich zunimmt (Einsatz in der Industrie als Schneidverfahren mit Wasserhochdruck seit langem bekannt).

### 1.2.2 Untersuchung der Wirkmechanismen und der Eindringtiefe

Im Zuge der Neufassung des DVGW-Merkblattes W 130 und der dringenden Notwendigkeit, die Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Regenerier- und Reinigungsverfahren zu vergleichen, wurde vom Fachausschuss Wassergewinnung des DVGW im Sommer des Jahres 2000 ein Forschungsprogramm initiiert. Ziel der Arbeit ist die Erforschung der Wirkungstiefe und der Wirkmechanismen einiger mechanischer Regeneriermethoden. Die praktischen Untersuchungen werden am Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V. an realen Brunnenmodellen durchgeführt.

Zur Konfiguration der Prüfstände und der Messverfahren wurden im Dezember 2000 erste Probeläufe durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse lassen eine gute dynamische Wirksamkeit des eingesetzten DWI-W erkennen. Endgültige Ergebnisse und Wertungen sind jedoch erst nach Ende der geplanten Versuchsreihe im Mai 2002 zu erwarten.

## 1.3 Systemtechnik

Die Einrichtungen für die technische Umsetzung des DWI-W lässt sich für nahezu alle Anwendungsfälle (Brunnen bis 1000 mm Durchmesser, Brunnen bis 400 m Tiefe) in einem dafür speziell ausgestatteten dreiachsigen Lkw unterbringen (Bild 1).

Die **Wasserhochdruckherzeugung** erfolgt beim E+M JET Master<sup>®</sup> durch eine 3-Kolben-Plungerpumpe, Leistung regelbar von 100 - 170 l/min, 100 - 500 bar Ausgangsdruck, Antriebsleistung 200 kW. Im Koffer-Aufbau mit

verstärkter Ladebordwand sind die Hochdruck-Kolbenpumpe, Jetting Tools, z. B. Drehdüse mit Abstandshaltern, Düsenzubehör, Rohrlanzen, Hochdruckschlauch, Schlauchhaspel sowie Schaltschrank, Hydraulisches Zubehör, z. B. Unterwassermotorpumpen, Steigrohre, Datenmess- und Erfassungsgeräte, verschiedenes Werkzeug untergebracht.

Weiterhin befindet sich ein Kompressor, der zum Entfernen der Aufladungen durch Absaugen vom Brunnenumpf benötigt wird, auf dem Fahrzeug. Ein Stromaggregat ermöglicht die autarke Eigenversorgung des JET Masters<sup>®</sup>.

## 2 Einsatzmöglichkeiten

Die Einsatzmöglichkeiten des DWI-W sind sehr umfangreich. Das Verfahren wird zur Reinigung und Regenerierung von Vertikalbrunnen, Horizontalbrunnen (Förder- und Infiltrationsbrunnen), Pegeln sowie Sickerfassungen eingesetzt. Die E+M Bohr-GmbH nutzt dieses Verfahren auch zur Entwicklung und Entsandung von neu gebauten Brunnen. Es werden in kurzer Zeit Spülung, Kiesunterkorn und Sandteilchen bis zur technischen Sandfreiheit entfernt (Bild 3).



*Bild 3: Baustelleneinrichtung zur Regenerierung eines Brunnens*

Durch die Anpassung der physikalischen Ausgangswerte wie z.B. Druck, Drehzahl, Düsenabstand zum Ausbaumaterial, Düsenart, Düsendurchmesser, können alle bekannten Ausbaumaterialien bearbeitet werden. Auch sehr alte und nur noch bedingt standfeste Filterbrunnen wurden mit dem DWI-W erfolgreich regeneriert. Das oft verwendete Argument der Zerstörung von Brunnen durch zu hohe Wasserdrücke kann bei fachgerechter Ausführung der Arbeiten und Beachtung von Grenzwerten ausgeschlossen werden.

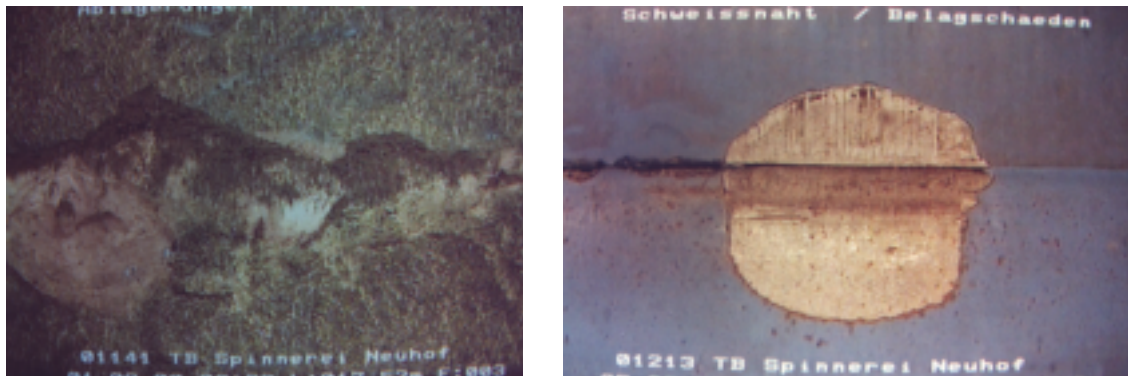
### 2.1 Regenerierung von Vertikalfilterbrunnen

Das Haupteinsatzgebiet des DWI-W ist die Anwendung im Vertikalfilterbrunnen, für den zunächst hinsichtlich dieser Regeneriermethode bau- und verfahrenstechnische Hinweise gegeben werden sollen.

Bereits vor Beginn der wissenschaftlichen Untersuchung des DWI-W zeigte sich die Wirksamkeit des Verfahrens im Filterkiesringraum. Durch die Entfernung von Ablagerungen, Schlamm und Sand findet eine Neustrukturierung der Kiesschüttung statt. Sie zeigt sich daran, dass sich der Filterkies im Lauf der Regenerierung setzt, was bei mit Sperrrohr ausgebauten Brunnen gut sichtbar ist.

Wichtig für den Anwender ist häufig eine **kurze Gesamtdauer der Regenerierung**. In vielen Versorgungsgebieten ist eine langdauernde Außerbetriebnahme eines Brunnens nicht leicht möglich. Das DWI-W bietet hier den Vorteil, dass die eigentlichen Regenerierarbeiten in der Regel einen Arbeitstag, maximal zwei Arbeitstage nicht überschreiten. Einschließlich Aus- und Einbau der Betriebspumpe sowie Kamerabefahrung vor und nach der Regenerierung ist somit ein Zeitaufwand von 4 bis 5 Tagen der Regelfall für Vertikalfilterbrunnen bis zu 200 m Tiefe.

Wie bei jedem Verfahren stellt sich auch beim DWI-W die Frage, ob es ein **schonendes Verfahren** ist. Dabei sei „schonend“ folgendermaßen definiert: Das Ausbaumaterial wird nicht übermäßig belastet. Dass zum Beispiel Beläge abgelöst werden, unter denen der Stahlkern des Filters bereits korrodiert ist, oder Filterteile, die der Korrosion unterlagen, ist bei einem wirkungsvollen Verfahren wie dem DWI-W weder vermeidbar noch unerwünscht. Schließlich will der Betreiber seinen Brunnen nach der Regenerierung in der Regel mit der Fernsehkamera noch einmal „ungeschminkt“ betrachten können (Bild 4).



*Bild 4: Betriebsbrunnen Spinnerei Neuhof. Links: Belagsschaden vor der Regenerierung von Ablagerungen überdeckt, rechts: Belagsschaden nach der Regenerierung sichtbar*

Der Fortschritt der Brunnenalterung muss sichtbar werden, um eine Entscheidungshilfe für die Notwendigkeit einer Sanierung zu haben. Die Erfahrungswerte in der Praxis zeigen, dass auch stark gealterte Filter einer Behandlung mit dem DWI-W standhalten. Dass es beim DWI-W nicht zur Beschädigung einer intakten Brunnenverrohrung kommt, liegt zweifellos in dem eingangs beschriebenen Wirk- und Regelmechanismus. Ein Verfahren, das erfolgreich zur Regenerierung eingesetzt werden soll, erfordert eine permanente **Kontrollmöglichkeit**. Die Vorgänge im Brunnen müssen zu jedem Zeitpunkt der Behandlung überprüfbar sein. Durch das kontinuierliche Abpumpen während des DWI-W ist eine Kontrolle, bei der sowohl für den Operator als auch für den Betreiber der Fortschritt und der Effekt des Verfahrens sichtbar werden, gegeben. Es werden in regelmäßigen Abständen Feststoff- und Schlammgehalt gemessen, bei der Bearbeitung ergibt sich dann meist folgender Verlauf:

- Beim Beginn der Bearbeitung kommt zunächst eine große Menge Schlamm, d. h., die Rohrrinnenwände und die Schlitzlöcher werden freigespült.
- Zeitlich versetzt steigt die Sandfracht an, denn die vererzten Ablagerungen und Sandpartikel brauchen wegen ihrer größeren Masse und Festigkeit mehr Zeit zur Mobilisierung.
- Bei fortschreitender Dauer gehen die Schlamm- und Feststofffrachten wieder zurück.
- Eine Steigerung der Abpumpmenge (z. B. wenn die Pumpe nach Bearbeitung der oberen Filterabschnitte eines Brunnens tiefer gehängt wird und der Wasserspiegel tiefer abgesenkt werden kann) hat noch mal eine zweite „Welle“ von Feststoff- und Schlammförderung zur Folge.
- Wenn schließlich die gemessenen Werte nicht mehr (nennenswert) zurückgehen – sie pendeln sich in der Regel bei Werten von 0 bis 0,5 ml/10 l ein – kann die Behandlung beendet werden. Als Ergebnis lässt sich die Behandlung grafisch gut veranschaulichen. Aus der gemessenen Sand- und Schlammkonzentration und der bekannten Abpumpmenge kann das Volumen des während der Regenerierung geförderten Sandes und Schlammes errechnet werden.

Eine weitere Überprüfbarkeit ist die Durchführung von (Kurz-)pumpversuchen vor und nach der Regenerierung. Dabei ist aber genau auf die Randbedingungen solcher Versuche zu achten, da an dieser Stelle durchaus manipuliert werden kann:

- Bei einer gekrümmten Q-s-Kurve wird vor der Regenerierung mit größerer Fördermenge gepumpt als nach der Regenerierung. Aus der Berechnung der spezifischen Absenkung aus Absenkung/Fördermenge ( $m/m^3/h$ ) ergibt sich dann bei der kleineren Fördermenge (nach) der Regenerierung der gewünschte „günstigere“ kleinere Wert, obwohl dieser ausschließlich aus der hydraulischen Fördercharakteristik des Brunnens, z. B. infolge des Vorliegens eines ungespannten Grundwasserleiters, resultiert.



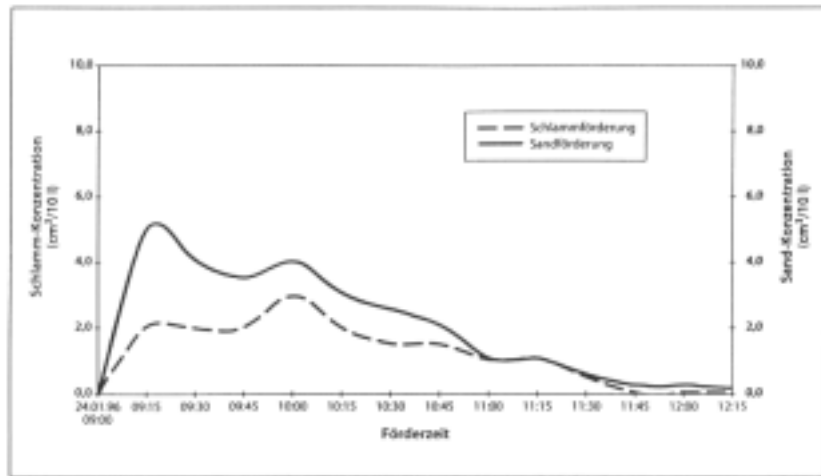


Bild 5: Grafische Darstellung der Regenerierung von TB2 in Bad Rodach

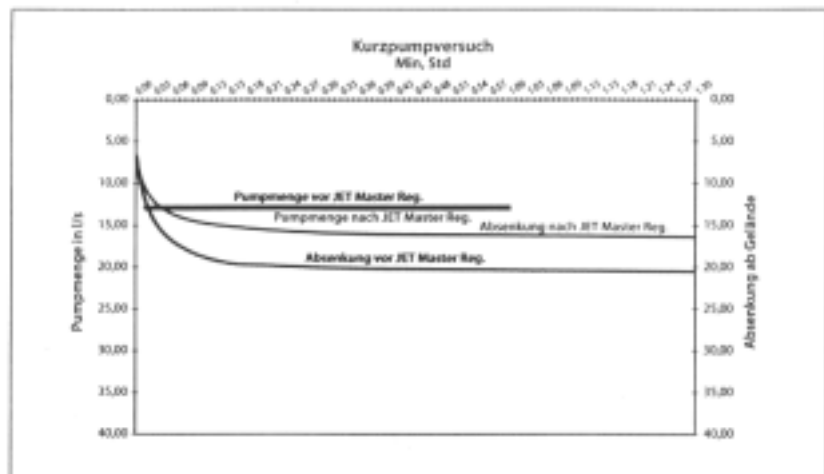


Bild 6: Grafische Darstellung der Kurzpumpversuche vor und nach der Regenerierung von TB2 in Bad Rodach

- Weitere Möglichkeiten zur Verschönerung des Ergebnisses bieten sich bei der Dauer, dem Zeitpunkt oder der Dokumentation des Kurzpumpversuches. Eine „Leistungssteigerung“ entsteht mancherorts durch die Auffüllung des Absenkttrichters während wochenlang dauernder Regeneriermethoden, bei denen wenig Wasser gefördert wird.

Oftmals sehen sich die ausführenden Unternehmen leider „zum Erfolg verpflichtet“; eine Leistungssteigerung wird als Muss betrachtet. Dabei sollte man sich im Klaren sein, dass häufig genug eine Regenerierung auch bei Entfernung großer Schlamm- und Sandmengen nicht zwangsläufig zu einer Änderung des Absenkverhaltens des Brunnens führt. Bei Brunnen im Festgestein mit gröberer Verkiesung ist in der Regel von vorneherein kein solcher Effekt zu erwarten. Er tritt meistens nur bei solchen Brunnen auf, die schon kurz vor der völligen Verockerung stehen. Es sollte eine „Leistungssteigerung“ nicht als einziger Indikator für den Erfolg der Regenerierung angesehen werden. Gerade die Einsicht in die Erkenntnis, dass eine Regenerierung bereits bei einer leichten Veränderung gegenüber dem Neubauszustand durchgeführt werden sollte, führt natürlich umgekehrt dazu, dass eine Regenerierung vom Absenkverhalten her keine Wunder bewirkt.

Als Beispiel für eine Regenerierung mit Kurzpumpversuch vor und nach der Regenerierung sei die Anwendung des DWI-W bei TB 2 in Bad Rodach dargestellt. Es wurde vor und nach der Regenerierung, ausgehend von etwa dem gleichen Ruhewasserspiegel, mit der gleichen Fördermenge über einen gleichen Zeitraum hinweg gepumpt. Bei der Regenerierung wurden Sand- und Schlammkonzentration, Fördermenge und Spüldruck dokumentiert (Bilder 5 und 6).

In der Literatur (PAUL, 1999) ist eine Regenerierung in Wiesbaden mit dem JET Master® kurz dokumentiert worden, bei der sich die Förderleistung des bearbeiteten Brunnens von 12 m³/h auf 47 m³/h verbesserte.

Es wurde auch bereits beobachtet, dass bei der Regenerierung von Vertikalfilterbrunnen nach der Bearbeitung mit dem DWI-W höhere Leistungen als im Neubauzustand erreicht werden. Dies ist ein Hinweis darauf, dass bei der Regenerierung nicht nur sämtliche Schmutzpartikel entfernt wurden, sondern darüber hinaus auch noch Spülungsreste, Unterkorn des Filterkieses und Feinbestandteile des Bodens, die normalerweise bei der Brunnenentwicklung entfernt werden sollen. Der Brunnen wurde also nicht nur regeneriert, sondern etliche Jahre nach dem Bau noch nachträglich entwickelt.

## 2.2 Entwicklung

Diese Erkenntnis führte zur Konsequenz, das DWI-W auch zur Entwicklung von Brunnen einzusetzen. Weiterhin liegt eine gewisse „Verwandtschaft“ des Verfahrens zur Johnson-Düse vor, die schon seit den sechziger Jahren vor allem in den USA zur Brunnenentwicklung eingesetzt wird (JOHNSON, 1961).

In einem sicher sehr selten möglichen Fallbeispiel im Raum Neustadt/Donau konnten die Entwicklungsverfahren „abschnittsweises Entsanden mit der Unterwasserpumpe zwischen Packerscheiben“ und das DWI-W direkt verglichen werden.

Im gleichen Erschließungsgebiet wurden zwei nahezu identische Brunnen in unmittelbarer Nähe, wenige hundert Meter voneinander entfernt, nacheinander im Jahr 1994 gebohrt:

- Gleiches Bohrverfahren, gleiche Bohrdurchmesser 670 mm und Ausbaudurchmesser 350 mm, gleicher Filterkies 2-3 mm,
- gleiche Geologie: Tertiär (Wechsellagen Mittelsand bis Feinsand, Schluff, Ton), Ruhewasserspiegel in etwa gleicher Höhe zu NN.

Tabelle 1

	Herkömmliches Verfahren Brunnen 4	Druckwellen-Impulsverfahren (Erzeugung durch Wasserhochdruck) Brunnen 5
Ausbau-Durchmesser	DN 350	DN 350
Filterstreckenlänge	30 m	35 m
Entwicklung	<b>Klarpumpen:</b> 6,5 Std. <b>abschnittsweises Entsanden:</b> 37,5 Std. <b>Gesamter Zeitaufwand:</b> 44,0 Std. 17.08. bis 24.08. (Abschnitte beendet bei 0,1 cm <sup>3</sup> /10 l)	<b>kein Klarpumpen</b> <b>JET (DWI-W): 15,5 Std.</b> 21.09., 16:00 bis 22.09., 07:30 (beendet bei 0,3 cm <sup>3</sup> /10 l)
Leistung im Pumpversuch	RWSP = 6,17 m, Q = 23 l/s Absenkung ab OKG 36,62 m - sandfrei	RWSP = 3,97 m, Q = 30 l/s Absenkung ab OKG 22,87 m - sandfrei

Der Unterschied bestand also lediglich im Verfahren der Entwicklung (siehe Tabelle 1). Als Ergebnis lässt sich festhalten:

- Bei deutlich geringerer Absenkung um ca. 11,50 m bezogen auf RWSP wurde bei Anwendung des DWI-W in Brunnen 5 eine um 30 % höhere Fördermenge im Pumpversuch entnommen.
- Der für die Entwicklung kürzere Zeitaufwand von 15,5 gegenüber 44 Stunden ist ebenfalls sehr bemerkenswert. Aufgrund des höheren Energieaufwandes beim Jetten konnte der Brunnen schneller und somit kostengünstiger bearbeitet werden.
- Der personelle Aufwand (jeweils in der Regel zwei Personen auf der Baustelle) ist bei beiden Verfahren gleich.

Die Entwicklung des Brunnens wird durch viertelstündige Messungen von Schlamm- und Sandkonzentration (ähnlich wie bei der Regenerierung) und des Förderstroms dokumentiert und kontrolliert. Das Jetten kann beendet werden, wenn Schlamm- und Sandkonzentrationen nicht mehr zurückgehen. Im Regelfall ergeben sich Endwerte von 0 bis 0,5 ccm/10 l Sand, in einigen Fällen wurde auch eine höhere, gleich bleibende Konzentration beobachtet. In einem Brunnen in Niederbayern wurde beispielsweise das Jetten nach 12 Stunden beendet. Die Sandkonzentration betrug über die letzten 5 Stunden der Bearbeitung um die 2,0 ccm/10 l, der Schlamm reduzierte sich in dieser Zeit von 20 auf 0 ccm/10 l. Die Pumpmenge betrug 17 l/s.

Beim abschließenden Brunnentest war das Wasser bei einer Fördermenge von 25 l/s sandfrei.



Bild 7: Einsatz des E + M JET Masters® zur Entwicklung eines Horizontalbrunnens in Krefeld

## 2.3 Horizontalbrunnen

Als ein Beispiel für den Einsatz an einem Horizontalbrunnen soll hier der Einsatz an 2 Brunnen der Wasserwerke Krefeld beschrieben werden (Bild 7). Bei diesem Einsatz sollten jeweils zwei ca. 85 m lange Filterstrecken pro Fassung entwickelt und entsandet werden. Weitere Brunnen­daten sind: Filtertyp: Wickeldrahtfilter, Schlitzweite: 1,0 mm, Rohrdurchmesser: DN 200, Tiefe der horizontalen Filterstrecken: 10 bis 12 m, erwartete Förderleistung pro Brunnen: 300 m³/h. Das gesamte Projekt wurde von LICHT, TRESKATIS & KNOPF (2001) beschrieben.

Vor Beginn der eigentlichen Entwicklung musste die gesamte Bohrspülung (bestehend aus Natrium-Bentonit mit Polymer) vollständig aus den Brunnen entfernt werden. Dazu wurde mit dem JET Master® direkt in den Filterbereich ein Spülbrecher unter hohem Druck eingearbeitet und anschließend entsprechend der Massebilanz die gesamte Bohrspülung vollständig entfernt. Die eigentliche Entwicklung und Entsandung erfolgte im Anschluss mit dem Ziel, ein natürliches Korngerüst um den nicht künstlich verkiesten Filterbereich zu schaffen und die technische Sandfreiheit zu erreichen. Weitere Kriterien, die für den Einsatz des DWI-W-Verfahrens sprechen, sind die Zeitersparnis und beschädigungsfreie Bearbeitung des neuen Brunnenausbaus. Die geforderte Sandfreiheit im Förderstrom von  $< 0,01 \text{ g/m}^3$  konnte nach durchschnittlich einem Tag pro Filterstranghälfte erreicht werden. Insgesamt wurden zum Aufbau der natürlichen Kiespackung an beiden Brunnen ca. 32,3 m³ Sand (Unterkorn aus den Porenräumen) entfernt. Tabelle 2 und Bild 8 zeigen die Entwicklung eines Filterstranges.

Tabelle 2: Entsandung und Entschlammung mit dem Jet Master von E+M (Krefeld) in der EB, Firma Hausstedt und Zimmermann, Br. 2 Zielgrube/Schacht)

Protokoll und Auswertung Feststoff-Förderung						
Zeit		Sand	Schlamm	Pumpmenge	Entsandung	Entschlammung
Std : Min	Diff (sec)	cm³/10 l	cm³/10 l	l/s	l	l
01:10:00	11:30	0,0	0,0	54,2		
12:00	1800	16,0	150,0	54,4	78,18	733,05
12:30	1800	20,0	320,0	48,7	167,02	2226,96
13:00	1800	14,0	210,0	48,7	149,02	2366,82
13:30	1800	18,0	120,0	48,7	140,29	1446,39
14:00	1800	20,0	70,0	48,8	166,73	833,63
14:30	1800	20,0	21,0	48,8	175,68	399,67
15:00	1800	10,0	12,0	48,8	131,79	144,84
15:30	1800	7,5	3,0	48,8	76,86	65,86
16:00	1800	6,0	0,0	48,8	59,29	13,18
16:30	1800	5,0	0,0	48,8	48,31	0,00
17:00	1800	4,0	0,0	48,5	39,41	0,00
17:30	1800	2,2	0,0	48,6	27,09	0,00
18:00	1800	1,5	0,0	48,6	16,18	0,00
18:30	1800	1,5	0,0	48,6	13,12	0,00
19:00	1800	1,5	0,0	48,6	13,12	0,00
19:30	1800	0,0	0,0	48,6	6,56	0,00
B	28800			Summe	1308,61	8230,51
Feststoff-Förderung mit Mammelpumpe (Absaugen der Auffangung)						
Reinweite	nach Reg	vor Reg	Länge (m)		Entsandung (%)	
3250	12,85	13,18	0,32		2573,65	
Wir haben also aus den Filterstrecken Ihres Brunnens mit unserem JET Master 3883,21 Liter bzw. 3,882206 m³ Sand und 8236,61 Liter bzw. 8,236698 m³ Schlamm bei einem Durchsatz von 1422,72 m³ Wasser gefördert.						



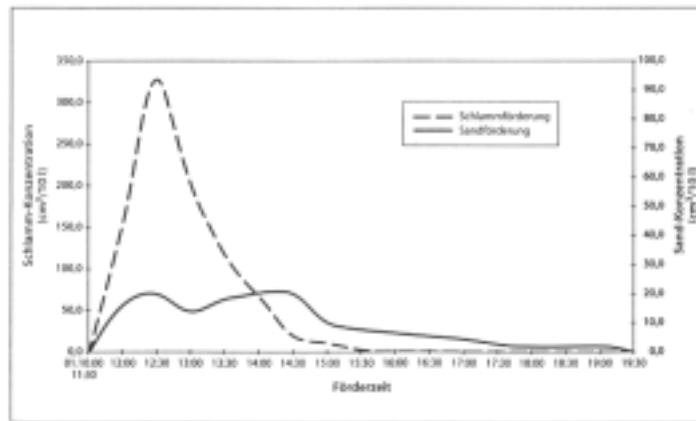


Bild 8: Grafische Darstellung der Entwicklung eines Horizontalbrunnens in Aivfeld (s. a. Tabelle 2)

### 3 Brunnenwartung, Eigenüberwachung und Nachhaltigkeit

Der Brunnenregenerierungsprozess sollte nicht als Einzelmaßnahme durchgeführt werden. Er ist vielmehr seitens der Betreiber in ein Konzept der Brunnenwartung und Eigenüberwachung einzubinden.

Zu einer kompletten **Brunnenwartung** gehören:

#### Sichtprüfungen

- der Bausubstanz von Brunnenvorschacht und Brunnenhaus
- der hydraulischen (Brunnenkopf, Rohrsysteme, Armaturen) und der elektrischen Einrichtungen im Brunnenschacht/Brunnenhaus
- der Betriebspumpe und Steigleitung

#### Beurteilung des Brunnenausbaus

- durch Befahrung mit der Farbfernsehkamera (TV-Untersuchung)
- durch Geophysikalische Messungen

#### Feststellung der hydraulischen und qualitativen Leistungsfähigkeit des Brunnens

- durch Pumpversuch
- durch Wasseranalysen

Weiterhin ist eine kontinuierliche **Eigenüberwachung** für eine Beurteilung des Brunnens in seinem Umfeld sehr wertvoll. Sie umfasst die:

- vorzugsweise wöchentliche, mindestens aber monatliche Messung des Ruhewasserspiegels und des Betriebswasserspiegels – möglichst bei Beharrung
- Registrierung der Pumpenlaufzeiten und Fördermengen
- Messung des Sandgehalts im Förderwasser und Untersuchung auf Fremdstoffe (Gasbläschen, Pumpenabrieb)

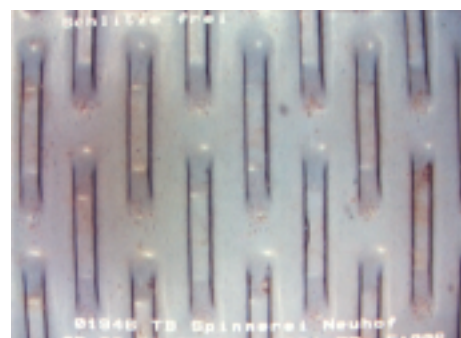
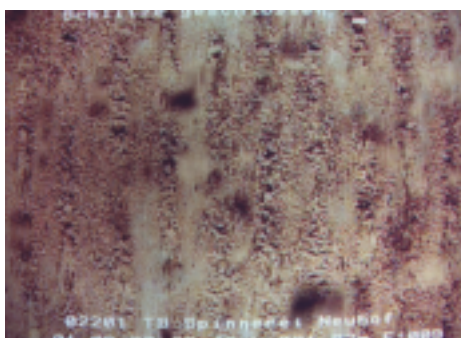


Bild 9: Betriebsbrunnen Spinnerei NeuhoF. Links: vor der Regenerierung Schlitzte geschlossen, rechts: nach der Regenerierung Schlitzte frei

Es sollte etwa alle 5 Jahre eine TV-Untersuchung und ein Pumpversuch durchgeführt werden. Bei dieser Gelegenheit sollte dann auch die ausgebaute Betriebspumpe und die Steigleitung untersucht werden. Nur anhand der Erkenntnisse aus Eigenüberwachung und dieser Regeluntersuchung kann fundiert über die Notwendigkeit einer Regenerierung entschieden werden.

Im Zusammenhang mit einer Regenerierungsmaßnahme ist eine TV-Untersuchung vorher (wenn nicht bereits bei Regeluntersuchung erfolgt) und nachher eine Selbstverständlichkeit (Bild 9). Wünschenswert wäre es, auch ggf. vorher und nachher Pumpversuche, mindestens aber Kurzpumpversuche durchzuführen.

Ein pauschaler Wert für die Dauer der Nachhaltigkeit einer Regenerierungsmaßnahme lässt sich wegen der vielen Einflussfaktoren (u. a. Betriebsweise des Brunnens, Wasserqualität, Art des Filterkieses und der Brunnenverrohrung) nicht angeben. Tatsache ist jedoch, dass beim DWI-W durch konsequenten Verzicht auf oxidierende chemische Regeneriermittel die bereits von TRESKATIS & LEDA (1998) beschriebene Rekristallisation von chemisch gelösten Ablagerungen und der damit verbundenen raschen Neuverockerung auf jeden Fall vermieden wird. Somit ist grundsätzlich eine größere Nachhaltigkeit als bei chemischen Regenerierungen zu erwarten.

## 4 Zusammenfassung

Das Druckwellen-Impulsverfahren (Erzeugung durch Wasserhochdruck) lässt sich mittlerweile durch wissenschaftliche Untersuchungen und reichlich Praxiserfahrung fundiert in seinem physikalischen Wirkprinzip und hydraulischen Grundlagen verstehen und beschreiben.

Bei der Anwendung ist es durch eine Reihe von Eigenschaften gekennzeichnet, die seine zunehmende Bedeutung in der Brunnenregenerierung und Brunnenentwicklung erklären:

- Vielseitigkeit betreffend Brunnentypen und Ausbaumaterialien
- hohe Einwirktiefe
- hohe Wirksamkeit bei der Lösung und Entfernung von unerwünschten Feststoffen und Schlamm bei neuen Brunnen in der Entwicklung und zu regenerierenden Brunnen
- praktische systemtechnische Umsetzung
- geringer Zeitaufwand für die Bearbeitung der Brunnen
- gute Kontrollmöglichkeit durch regelmäßige Schlamm- und Feststoffmessung während der Bearbeitung, Fernsehbeobachtung und Pumpversuche vor und nach der Bearbeitung
- schonendes Verfahren
- hohe Nachhaltigkeit

## Literatur

SAAED, M. (1996): Vorbereitung und Durchführung von Modellversuchen für die Brunnenreinigung unter Verwendung von Wasser unter hohem Druck. - Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg

PAUL, K.F. (1999): Überwachungsmethoden im Bereich der Brunnenregenerierung. - In DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 93, Seite 254, Bonn

JOHNSON Division „JET Development Does the Work“. - Reprint from Nov.-Dec. 1961 Johnson National Drillers Journal

TRESKATIS, C. & LEDA, M. (1998): Brunnenregenerierung – Anwendung mechanischer und chemischer Verfahren am Beispiel von Flach- und Tiefbrunnen am linken Niederrhein. - bbr Wasser und Rohrbau, Ausgabe 9, R. Müller Verlag, Köln

LICHT, F., TRESKATIS, C. & KNOPF, O. (2001): Einsatz der gesteuerten Horizontalbohrtechnik im Brunnenbau. - bbr Wasser, Kanal- und Rohrleitungsbau, Ausgabe 1, R. Müller Verlag, Köln