

**Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V.**

Meraner Str. 10 - 01217 Dresden

DVGW-Forschungsvorhaben

W 55/99 - Brunnenregenerierung

**Untersuchungen zur Bewertung  
von Gerätetechnik auf die  
Wirksamkeit in der Kiesschüttung**

Ergebnisbericht

Dresden, Juli 2003

.....  
Dr. rer. nat. F. Börner  
Geschäftsführer DGFZ e. V.

## Anmerkungen in eigener Sache

Die F/E-Aufgabe

### **Brunnenregenerierung – Untersuchungen zur Bewertung von Gerätetechnik auf die Wirksamkeit in der Kiesschüttung**

wurde auf Anregung des Technischen Komitees „Wassergewinnung“ durch einen Projektbeirat begleitet. Die Aufgabe des Projektbeirates bestand in der Sicherung der aufgabenorientierten Fördermittelverwendung und die Kontrolle der F/E-Aktivitäten im Sinne der Zielstellung.

Besetzt war der Beirat für dieses Thema durch die Herren

- Dr.-Ing. D. Eichhorn (Vorsitzender)
- Dipl.-Ing. H. Etschel
- Dipl.-Ing. K. F. Paul
- Prof. Dr.-Ing. habil. L. Luckner.

Das Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V. (DGFZ) als Zuwendungsempfänger dankt dem Projektbeirat für seine fachkundige Unterstützung und damit für das Gelingen dieses Vorhabens.

Leider schied der Themenbearbeiter, Herr Dipl.-Ing. Thomas Jakob, noch vor der Fertigstellung des Endberichtes aus dem DGFZ e. V. aus. Das DGFZ e. V. dankt seinem Vorstandsmitglied, Herrn Dr.-Ing. D. Eichhorn, für die Bearbeitung der hiermit vorgelegten Dokumentation, die als Abschlussbericht gilt.

Dresden, Juli 2003

.....  
Dr. rer. nat. F. Börner  
Geschäftsführer DGFZ e. V.

# Inhaltsverzeichnis

## Ergebnisbericht

		<b>Seite</b>
<b>1</b>	<b>Vorbemerkungen</b>	<b>5</b>
1.1	Veranlassung	5
1.2	Forschungsförderung	5
1.3	Aufgabenstellung	6
1.4	Einordnung der Arbeit	8
<b>2</b>	<b>Bewertungsgegenstände</b>	<b>10</b>
2.1	Auswahlprinzip	10
2.2	Seiher	10
2.3	Spülkopf	11
2.4	Spülaggregate	14
2.5	Druckwellengeneratoren	15
2.5.1	Doppelrotationsaggregate	15
2.5.2	Pulsator	16
2.5.3	Impulsgenerator	17
2.5.4	Ultraschallgeber	19
2.5.5	Mehrkammergerät	19
<b>3</b>	<b>Testanlagen</b>	<b>21</b>
3.1	Versuchsanlage 1	21
3.1.1	Rahmenbedingungen	21
3.1.2	Bauliche Gestaltung	21
3.1.3	Testaufgaben	24
3.1.4	Messtechnik	24
3.2	Versuchsanlage 2	29
3.2.1	Rahmenbedingungen	29
3.2.2	Bauliche Gestaltung	29
3.2.3	Testaufgaben	31
3.2.4	Messtechnik	31
<b>4</b>	<b>Testprogramm</b>	<b>33</b>
4.1	Rahmenbedingungen	33
4.2	Vorarbeiten/Testprogramm	34
4.3	Realisierte Tests	35
4.3.1	Niederdruckspülgerät	35
4.3.2	Hochdruckspülgeräte	36
4.3.3	Doppelrotationsaggregat	39
4.3.4	Pulsator	40
4.3.5	Impulsgenerator	41
4.3.6	Ultraschallsonden	43
4.3.7	Mehrkammergerät	45
4.4	Haupttestphasen	46

<b>5</b>	<b>Testergebnisse</b>	<b>47</b>
5.1	Ergebnisse der Testserie	47
5.1.1	Ausgangswerte	47
5.1.2	Spülkopf	47
5.1.3	Spülaggregate	50
5.1.4	Doppelrotationselement	50
5.1.5	Pulsator	52
5.1.6	Zwischenbewertung des Messverfahrens	53
5.2	Ergebnisse der Testserie 2 (Schwingungsmessungen und Strömungsmessungen)	54
5.2.1	Ausgangswerte	54
5.2.2	Spülkopf	54
5.2.3	Rotationshochdruck-Geräte	58
5.2.4	Doppelrotationsaggregat	64
5.2.5	Pulsator	69
5.2.6	Impulsgenerator (pigadi)	72
5.2.7	Impulsgenerator (AQUAPLUS)	75
5.2.8	Ultraschall-Sonden	76
5.2.9	Mehrkammergeräte (hydraulische Aspekte)	79
<b>6</b>	<b>Mathematische Nachweise</b>	<b>83</b>
6.1	Strömungsmodell	83
6.2	Seiher	85
6.3	Spülkopf	88
6.4	Doppelrotationsaggregat	91
6.5	Mehrkammergeräte	94
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>96</b>
7.1	Druckwellenvergleich	96
7.1.1	Frequenzen	96
7.1.2	Beschleunigung	97
7.1.3	Wegamplitude	100
7.1.4	Spezifischer Energieeintrag	101
7.2	Strömungsfeldvergleich	103
7.3	Gerätebewertung	103
7.3.1	Seiher	103
7.3.2	Spülköpfe	104
7.3.3	Spülaggregate	104
7.3.4	Doppelrotationsaggregat	104
7.3.5	Pulsator	105
7.3.6	Impulsgenerator	105
7.3.7	Sonden	105
7.3.8	Mehrkammergeräte der chemischen Regenerierung	106
7.4	Schlussatz	106
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>

## **1 Vorbemerkungen**

### **1.1 Veranlassung**

Im Jahr 1997 sah sich der DVGW-Fachausschuss „Wassergewinnung“ veranlasst, das 1992 veröffentlichte Merkblatt „W 130“ -Brunnenregenerierungen-, nach einer Laufzeit von nur 5 Jahren, einer Überarbeitung zu unterziehen. Den Anlass für diese Entscheidung setzten einerseits die Entwicklungsdichte der Regeneriertechnologien der letzten Jahre und andererseits die daraus entstandenen Verunsicherungen bei den Brunnenbetreibern, die Schwierigkeiten bei der Auswahl der verfügbaren Regenerierverfahren anzeigten.

Der für eine Merkblattüberarbeitung relativ lange Bearbeitungszeitraum (1997 bis 1999) war dem Anliegen geschuldet, alle auf dem deutschen Markt derzeit praktizierten Technologien möglichst vollständig zu erfassen und in ihrer Wirkung zu beschreiben. Selbst das CO<sub>2</sub>-Verfahren, das unmittelbar vor Redaktionsschluss des Merkblattes in Deutschland erstmals angewandt wurde, fand noch Eingang in das neu entstehende Merkblatt.

Während der Merkblattbearbeitung führte der Arbeitskreis mit nahezu allen Verfahrensträgern einen intensiven Informationsaustausch durch, wobei jede der erfassten Techniken theoretisch beurteilt wurde. Die Bewertung der Wirkungsbereiche blieb dabei letztlich den Einschätzungen der Verfahrensträger und der kritischen Beurteilung der Mitglieder des Arbeitskreises „W 130“ vorbehalten.

Obwohl das im Jahre 2001 verabschiedete Merkblatt „W 130“ infolge des erreichten Niveaus und auch wegen seines breiten, aktuellen Spektrums für das Arbeitsblatt „W 120“ bereits als Basis genutzt werden konnte, regte der Fachausschuss „Wassergewinnung“ an, dass zu dieser Thematik eine F/E-Aufgabe formuliert wird, in deren Ergebnis die subjektive Bewertung der Wirksamkeit durch objektive Messungen und Analysen untersetzt werden sollte.

### **1.2 Forschungsförderung**

Mit dem Angebot vom 17.01.2000 bewarb sich das Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V. um eine Forschungsförderung. Die DVGW-Hauptgeschäftsstelle reichte die Förderzusage für diese F/E-Aufgabe am 07.07.2000 unter der Nummer 55/99 aus.

Eine Förderzusage erhielt das DGFZ e. V. auch durch die Firmen

- E+M Bohr GmbH,
- IBB Ingenieur- und Beratungsbüro für Brunnenbetriebstechnik und -instandhaltung GmbH

in Form der kostenfreien Beistellung von Versuchsanlagen, die letztlich den Zuwendungsempfängern als Eigenleistungen angerechnet wurden, sowie durch die

- DGC GmbH,

die die allgemeinen Kosten (Mieten, Reisekosten u. a. m.) und den Endbericht übernahm.

Als weitere Förderung wird auch die kostenlose Bereitstellung der Regeneriertechnik für die Kennwertermittlung im Forschungszentrum gewertet. In diesem Zusammenhang sei den Firmen

- E+M Bohr GmbH,
- AQUAPLUS Brunnensanierung H. Munding GmbH & Co. KG,
- AQUA BRUNNEN SERVICE Brunnensanierungstechnik GmbH,
- PST Spezialtiefbau GmbH Brunnenbau,
- pigadi GmbH,
- Sonic Umwelttechnik GmbH und
- Vormann GmbH & Co. KG

für die Unterstützung des F/E-Vorhabens W 55/99 gedankt.

### **1.3 Aufgabenstellung**

Die vom Zuwendungsempfänger im Rahmen seines Angebotes formulierte Aufgabenstellung orientierte sich auf die Messung der Tiefenwirkung ausgewählter Regeneriertechniken unter klar definierten Rahmenbedingungen in Versuchsanlagenbedingungen mit unbelastetem Material. Eine Aussage zur Reinigungswirkung der einzelnen Technologien, wobei stets die gekoppelten Trenn- und Austragsprozesse den Gesamteffekt erzielen, war damit nicht Gegenstand der F/E-Aufgabe. Im Antrag hieß dies:

„Das Ziel der Arbeit liegt in erster Linie in der Erforschung der Wirkungstiefe und die Klärung der Wirkmechanismen einiger vom DVGW-Fachausschuss „Wassergewinnung“ ausgewählter und heute auf dem Markt angebotener Regeneriertechnologien in Abhängigkeit vom Filterrohrmaterial, den Filterkieskörnungen und dem Kornaufbau des Grundwasserleiters. Insbesondere sollen die hydraulischen und erdstoffmechanischen Effekte in den Zonen, die sich den visuellen Kontrollen des Vertikalfilterbrunnens entziehen und heute in den meisten Fällen gemutmaßt werden, erkundet werden. Der im Rahmen der

Forschung zu betrachtende Untersuchungsraum erstreckt sich damit von der Kontaktzone Filterrohr/Filterkies, über die Filterkiesschüttung, weiter über die Kontaktzone Filterkies/Boden, bis in die anstehende Bodenformation.“

Die Untersuchungen sollten in zwei Großversuchsanlagen im Maßstab 1 : 1 durchgeführt werden. Das 1. Jahr der Themenbearbeitung war dem Aufbau, der Komplettierung und der Aufrüstung der Großversuchsanlagen und der Erprobung der geeigneten Nachweisverfahren vorbehalten. Das 2. Bearbeitungsjahr orientierte auf die Durchführung der Tests in der Großversuchsanlagen.

Bei der Themenbearbeitung im 2. Bearbeitungsjahr hatten sich zwei Entwicklungen gezeigt, die letztlich eine Präzisierung der Aufgabenstellung nach sich zogen. Zum einen erwiesen sich die Aufwendungen für die Umgestaltung der Rahmenbedingungen in der Versuchsanlage VA 1 sehr bzw. zu aufwendig, der manuelle Aufwand lag deutlich höher als geplant und zum anderen war die Bereitschaft der Verfahrensträger im 2. Bearbeitungsjahr in einer solchen Breite vorhanden, dass die Aufgabenstellung umgestaltet werden konnte. Für das 2. Bearbeitungsjahr galt dann:

- In den Versuchsanlagen sollen möglichst viele der im Merkblatt genannten Techniken geprüft werden.
- Da für die Hochdruckwasserspülung auffallend viele Entwicklungen (Gerätetypen) auf dem Markt eingesetzt werden, sollte im Rahmen dieser Arbeit eine Mehrfachtestung (mindestens zwei Geräte) erfolgen.
- Analog dazu sollte versucht werden, beide Entwicklungen der Ultraschalltechnik auf dem Versuchsstand VA 1 zu testen.
- Auf die Varianten von Filterrohrmaterial, Filterkies und Boden sollte in Folge der Erhöhung der Messreihen der Gerätetechnik verzichtet werden.

Mit dem Verzicht auf die Variation des Filtermaterials und des Filterkiesmaterials wurden die Kapazitäten, die ursprünglich auf Labortests ausgerichtet waren, auf die mathematische Modellierung von Strömungsprozessen umgewidmet, da diese Ergebnisse eine Untersetzung und Prüfung der Messergebnisse versprachen.

Bei der gleitenden Anpassung der Aufgabenstellung behielt der Projektbeirat den Kernsatz des Forschungsantrages

„Im Ergebnis der Forschung erwartet der DVGW-Fachausschuss Wassergewinnung eine Schrift, die das neue Merkblatt „W 130“ untersetzt und die Wasserversorgungsunternehmen in die Lage versetzt, ihre Anforderungen an die Regenerierung von Vertikalfilterbrunnen zu qualifizieren und zu quantifizieren“

im Auge und sicherte damit das ursprüngliche Anliegen.

## 1.4 Einordnung der Arbeit

Bei der Bewertung von Regeneriertechnologien im Hinblick auf die erreichbaren Effekte und die angestrebte Effizienz ging der Arbeitskreis des „W 130“ immer von der Analyse der Grundfunktionen aus. Die Grundfunktionen einer Regeneriertechnologie sind dabei von den Aufgaben der Regenerierung abgeleitet und bestehen in:

1. Dem Trennen von Ablagerungen und Aufwüchsen von den Basisflächen, d. h. von den Brunnenausbaumaterialien (Brunnenverrohrung und Kornfilter) und von der anstehenden Bodenformation im nahen Umfeld des Brunnens, soweit diese von den Kolmationsprozessen überhaupt erfasst sind.
2. Dem Austrag des abgetrennten und/oder abgelösten Materials aus den Porenräumen des künstlich eingebauten Kornfilters bzw. von der Brunnenverrohrung und im Idealfall auch aus der im Umfeld anstehenden Bodenformation.
3. Der Kontrolle des Austragseffektes, um daraus die Dauer einer Behandlung, deren Effektivität und bei den chemischen Verfahren ihre Umweltverträglichkeit nachzuweisen.

Eine positive Bewertung hat danach die Technologie zu erwarten, die einen großen Trenneffekt erreicht und in der Lage ist, das getrennte Material möglichst vollständig aus dem Brunnen und dem Brunnenumfeld auszutragen, und wenn die Prozesse Trennen und Austrag bzw. der Gesamtprozess kontrollierbar ablaufen kann und der Austrag durch Messungen überwacht wird.

In Abhängigkeit von der Art des Regenerierverfahrens erfolgt der Trennprozess recht unterschiedlich. So nutzen die mechanischen Verfahren in erster Linie Scherkräfte, die entweder durch Fließprozesse oder aus Schwingungen heraus erzeugt werden, während bei den chemischen Verfahren die Trennprozesse durch Lösung erreicht werden.

Unabhängig von der Art der Regenerierverfahren kann auch der Austrag völlig unterschiedlich organisiert werden, indem er entweder als ein mit der Trennung kontinuierlicher Prozess abläuft oder auch als völlig getrennter Prozess organisiert wird.

Aus der Vielfalt der Prozesse, die letztlich die Wirksamkeit einer Technologie bestimmen, sollten im Rahmen dieser F/E-Arbeiten die physikalischen Prozesse untersucht werden, die unter den Rahmenbedingungen der zur Verfügung stehenden Versuchsanlagen messbar sind. Für die Verfahren, die für die Trennung und/oder den Austrag Spülprozesse nutzen, bestand die Zielstellung im Nachweis der Strömungsprozesse in den genutzten Strömungsfeldern.

Für die Druckwellen-/Impulsverfahren bestand die Zielstellung im Nachweis der Druckwellendämpfung mit fortschreitender Entfernung vom Brunnen.

Durch die Verwendung von unbelastetem Material sollte erreicht werden, dass die Aussagen zu jeder Technologie unter gleichen Rahmenbedingungen erfolgen und damit vergleichbar werden. Durch die Verwendung von unbelastetem Material



wurde insbesondere der letztgenannte Aspekt noch einmal mit aller Deutlichkeit unterstrichen.

Das Ziel der F/E-Aufgaben bestand damit in der Bewertung ausgewählter Aspekte einiger regeneriertechnologien. **Mit den Messungen der Eindringtiefen sollte erreicht werden, den Wirkungsbereich der einzelnen Technologien präziser bewerten zu können.** Die Aufgabe war nicht darauf ausgerichtet, die Wirkung der Verfahren an sich zu bewerten.

## **2 Bewertungsgegenstände**

### **2.1 Auswahlprinzip**

Aus der Palette der im Merkblatt „W 130“ genannten Technologien zur Regenerierung von Brunnen wurde für die durchzuführenden Untersuchungen Gerätetechnik ausgewählt, deren Bewertung entweder in der Großversuchsanlage oder im mathematischen Modell realisierbar erschienen. Die Reihenfolge der im Weiteren untersuchten Geräte ist der im Merkblatt „W 130“ (Tabelle A1) gewählten Reihenfolge der Verfahren angepasst.

### **2.2 Seiher**

Der Seiher stellt das Gerät der Intensiventnahmetechnik dar, das in das Brunnenrohr eingehängt wird und den Behandlungshorizont nach oben und nach unten abgrenzt.

Bei der Intensiventnahme erfolgt eine sehr hohe hydraulische Belastung eines Brunnenabschnittes, indem die Wasserentnahme im Brunnenrohr auf den Abschnitt des Seiher oder auch durch Dichtelemente an einer Unterwasserpumpe begrenzt wird. Die bei der Entnahme in den Filterschlitz auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten betragen dabei ein Mehrfaches der Betriebsbelastung. Durch die mit dieser Strömungsgeschwindigkeit verbundenen Strömungskräfte soll eine Ablösung der Ablagerungen aus den Filterschlitz, aus dem Kornfilter und auch aus dem Umfeld des Brunnens angestrebt werden.

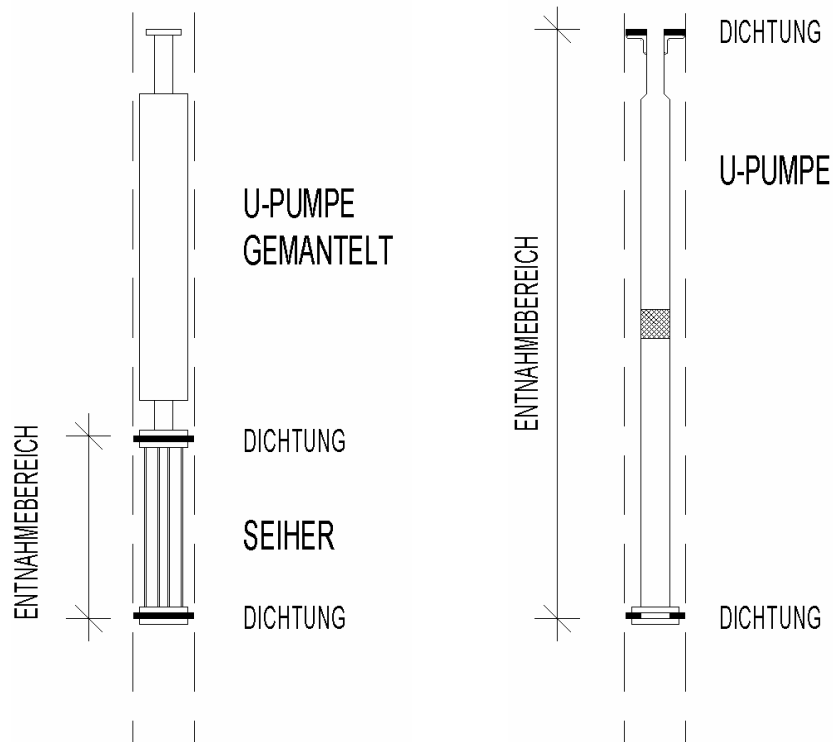
Im Merkblatt „W 130“ ist der Intensiventnahme u. a. folgendes bestätigt:

- Filterschlitz, Kiesschüttung und angrenzende Bodenformation gelten zum Arbeitsbereich,
- hoher Wirkungsgrad insbesondere bei Versandung,
- Umlagerung und Veränderung der Kiesschüttung möglich.

Im Rahmen der F/E-Aufgabe sollte nachgewiesen werden, in welchem Maße die hydraulische Wirkung einer Abpackerung des Brunnenrohres im Filterkiesraum aufgelöst wird und welche Wirkung in der angrenzenden Bodenform erzielt werden kann.

Die Nachweise sollten über ein mathematisches Strömungsmodell geführt werden, da die verfügbaren Testanlagen dafür nicht die erforderlichen Voraussetzungen bieten.

Die **Abbildung 2-1** veranschaulicht technische Lösungsvarianten.



**Abb. 2-1:** Schematische Darstellung von Intensiventnahmeeinheiten  
a) Seiher mit gemantelter Unterwasserpumpe  
b) abgepackte U-Pumpe

### 2.3 Spülkopf

Als Arbeitsgerät der Niederdruckwasserspülung wird der Spülkopf auf eine Unterwassermotorpumpe montiert und arbeitet an der Steigleitung hängend im Brunnenrohr.

Bei der Niederdruckwasserspülung (NDWS) werden über einen Spülkopf Wasserstrahlen großen Durchmessers mit niedrigem Druck, aber hoher Geschwindigkeit aus einem mit Düsen besetzten Spülkopf auf die Rohrwand bzw. die Filteröffnungen gerichtet. Die relativ starken Wasserstrahlen treten dabei zu einem Teil durch die Filteröffnungen in die Kiesschüttung ein. Im Kornfilter kommt es zur Umlenkung der Strahlen und das Spülwasser fließt in den Brunneninnenraum zurück. Der andere Teil fließt im Brunneninnenraum (unproduktiv) der Pumpe wieder zu.

Bei der NDWS kommt es zu einer intensiven Durchspülung der Perforation des Filterrohres und der Kiesschüttung, wobei die Trennung der Ablagerungen vom Filterrohr und von dem Filterkorn angestrebt wird. Bei der diskontinuierlichen Abführung eines Teilstromes aus dem Brunnen heraus erfolgt der Austrag der abgetrennten Ablagerungen und dadurch die Kontrolle des Fortschrittes der Regenerierung.

Im Merkblatt „W 130“ ist der NDWS u. a. folgendes bestätigt:

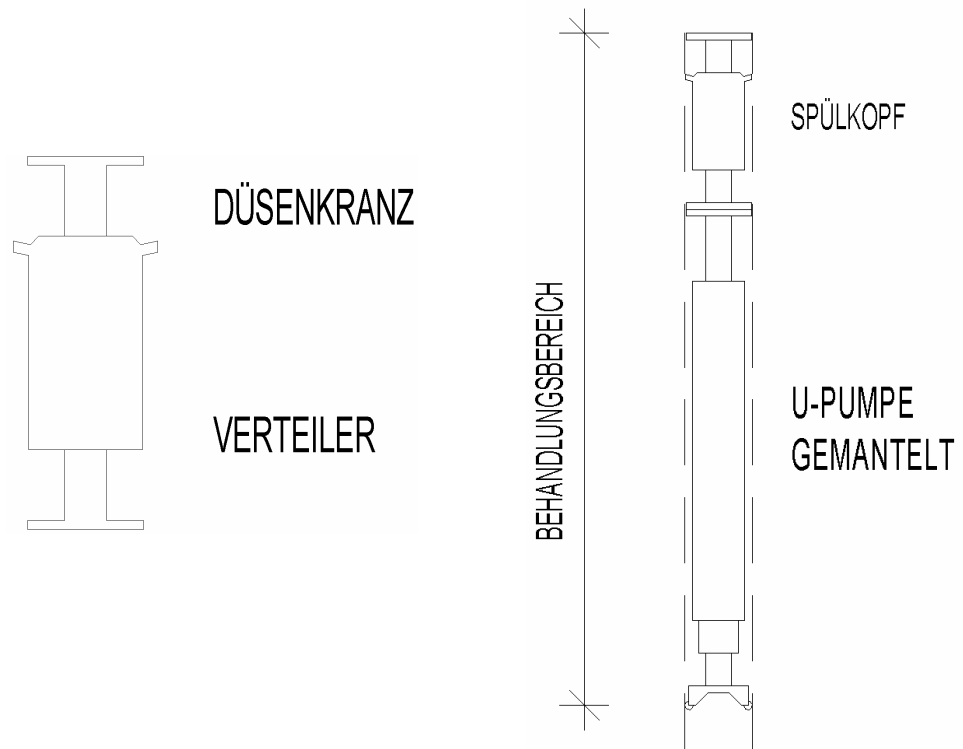
- Filterschlitz, Kiesschüttung und angrenzende Bodenformation gelten zum Arbeitsbereich,
- hoher Wirkungsgrad bei Versandung,
- Umlagerung und Veränderung der Kiesschüttung möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte nachgewiesen werden, bis zu welcher Tiefe der Einfluss einer NDWS bei einer ungealterten Filterkiesschüttung überhaupt möglich ist. Der Nachweis sollte über die Darstellung der erzielbaren Strömungsfelder erfolgen. Das Ergebnis war im mathematischen Modell zu überprüfen.

Für die Darstellung der Strömungsprozesse der Niederdruckwasserspülung boten die Modelldimensionen in der Versuchsanlage VA 2 erst ausreichende Voraussetzungen, nachdem der Spülkopf mit einer unterdimensionierten U-Pumpe ausgerüstet war. Mit der Reduzierung der Fördermenge konnte damit zumindest die qualitative Aussage gesichert werden.

Um das Strömungsfeld unter realen Bedingungen darzustellen, sollten durch ein mathematisches Modell die Strömungsprozesse bei einer realen Gerätekonfiguration ermittelt werden.

Die **Abbildung 2-2** veranschaulicht die Gerätetechnik schematisch.



**Abb. 2-2:** Schematische Darstellung der NDWS-Technik

## 2.4 Spülaggregate

Bei der Hochdruckspültechnologie zur Innenspülung der Brunnenrohre werden über Spülaggregate Wasserstrahlen geringen Durchmessers unter sehr hohem Druck auf die Rohrwand bzw. die Filterschlitz gerichtet. Die Spülaggregate verfügen in der Regel über einen Düsenblock mit 2 bis 3 Düsen. Durch die Zwangsrotation des Düsenblocks wird der gesamte Umfang der Verrohrung erreicht und dabei angestrebt, dass Ablagerungen in den Filterschlitz und in der unmittelbar anschließenden Filterkiesschüttung abgetrennt werden. Die Technologie arbeitet grundsätzlich mit Fremdwasser. Der Austrag der getrennten Partikel erfolgt gleichzeitig mit der Trennung durch Abpumpen einer Wassermenge, die größer als die des eingetragenen Fremdwassers ist.

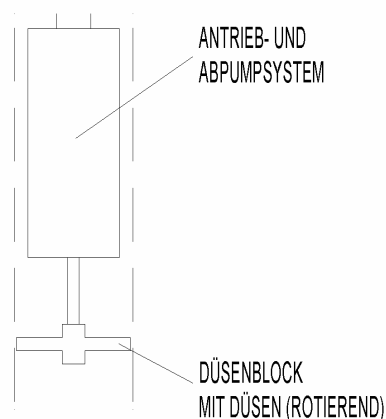
Im Merkblatt „W 130“ wird der Hochdruckinnenspülung folgendes zugesprochen:

- Rohrwand, Filterschlitz und Kiesschüttung gehören zum Arbeitsbereich,
- hoher Wirkungsbereich bei Veränderung,
- Umlagerung und Veränderung der Kiesschüttung.

Analog der Niederdruckspültechnologie sollten für die Wirkung der Spülaggregate die Strömungsfelder bei der Arbeit im ungealterten Material dargestellt werden.

Für den Nachweis der Spülwirkung des Spülaggregates versprach die Versuchsanlage VA 2 ausreichende Voraussetzungen. Die Erfassung des Beeinflussungsfeldes sollte durch die räumliche Erfassung der Potenzialverteilung erfolgen.

Die **Abbildung 2-3** veranschaulicht die getestete Gerätetechnik schematisch.



**Abb. 2-3:** Schematische Darstellung von Hochdruckspülaggregaten

## 2.5 Druckwellengeneratoren

### 2.5.1 Doppelrotationsaggregate

Bei der DWI-Wasserhochdruck-Technologie wird über ein Doppelrotationsaggregat mit exzentrisch angeordneten Düsen (4 Stück auf 2 Ebenen) Fremdwasser in den Brunneninnenraum verdüst. Die Rotation der exzentrisch angeordneten Düsenpaare erfolgt infolge des Rückstoßprinzips. Die Rotationsgeschwindigkeit ist über den Betriebsdruck und die Betriebswassermenge regelbar, wird aber nicht gemessen.

Der Betrieb des Doppelrotationsaggregats vermag an der Brunnenrohrinnenwand Trenneffekte durch Abspülen zu erreichen und außerdem permanente Schwingungen zu erzeugen.

Das Doppelrotationsaggregat, dessen Umdrehungszahl mit bis zu 10.000 U/Min. geschätzt wird, erzeugt bei der Arbeit Kavitationseffekte, die wiederum Schwingungen auslösen.

Die erzeugten Schwingungen breiten sich über die Kornschüttung in das Umfeld eines Brunnens aus. Durch die Schwingungen erfolgt eine Vibration des Filterrohres, der Körner der Kiesschüttung und der anstehenden Bodenformation, wobei die Beläge vom Filterrohr, dem Schüttkorn und dem natürlichen Material gelöst werden.

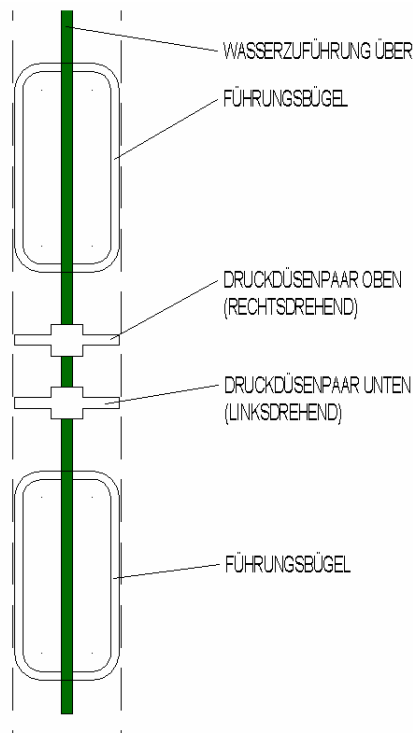
Im Merkblatt „W 130“ wird der Wasserhochdrucktechnik folgendes bescheinigt:

- Rohrrinnenwandung, Filterschlitze, Kiesschüttung und angrenzende Bodenformation gehören zum Arbeitsbereich,
- hoher Wirkungsbereich bei Versandung,
- Umlagerung und Veränderung der Kiesschüttung möglich.

Im Rahmen der F/E-Arbeit sollte nachgewiesen werden, welche Parameter die Druckwellen eines Doppelrotationsaggregates haben (Frequenz, Beschleunigung, Wegamplitude, Energieeintrag) und in welchem Maße die Druckwellen eine Dämpfung bei der Ausbreitung aus dem Brunnen erfahren.

Weiterhin sollte geklärt werden, inwieweit beim Einsatz eines Doppelrotationsaggregates Strömungsprozesse generiert werden.

Die **Abbildung 2-4** veranschaulicht die Darstellung eines Doppelrotationsaggregates schematisch.



**Abb. 2-4:** Schematische Darstellung eines Doppelrotationsaggregates

## 2.5.2 Pulsator

Der Pulsator ist das Arbeitsgerät der DWI-Knallgastechik. Er vermag Druckwellen zu erzeugen, indem in einem Behälter Wasser in seine Grundbestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, zerlegt und dieses Gasgemisch nach Erreichen eines gewissen Volumens elektrisch gezündet wird.

Bei der Zündung des Knallgasgemisches fällt die Gasblase in sich zusammen und bildet Wasser. Im physikalischen Sinne ist der Vorgang als Implosion zu werten. Die Implosion löst dabei einen Impuls aus, der sich nach allen Seiten gleichmäßig ausbreitet. Durch die Schwingungen erfolgt eine Vibration von Filterrohr, Filterkies und der Körner der anstehenden Bodenformation und in der Folge eine Trennung der Ablagerung von dem Filterrohr, dem Filterkies und ggf. von der anstehenden Bodenformation.

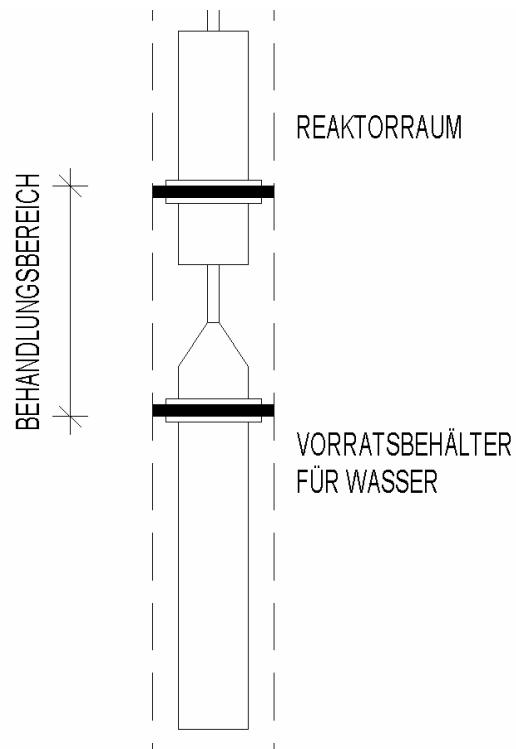
Im Merkblatt „W 130“ ist der Knallgastechologie folgendes bescheinigt:

- Rohrrinnenwand, Filterschlitz, Kiesschüttung und angrenzende Bodenformation gehören zum Arbeitsbereich,
- Umlagerung und Veränderung der Kiesschüttung möglich.



Im Rahmen der F/E-Arbeit sollte primär die Charakteristik der Druckwelle und deren Dämpfung bei der Ausbreitung aus dem Brunnen geklärt werden. Der Spüleffekt wird diesem Gerät abgesprochen. Diese Einschätzung wurde auch in den Versuchsanlagen mit aller Deutlichkeit nachgewiesen.

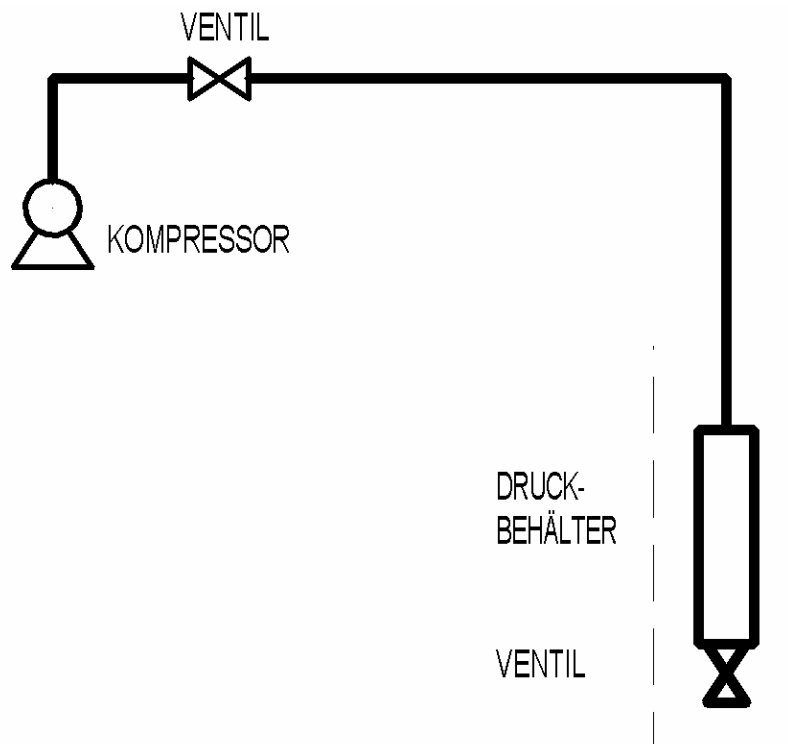
Die **Abbildung 2-5** veranschaulicht die Gerätetechnik schematisch.



**Abb. 2-5:** Schematische Darstellung des Pulsators

### 2.5.3 Impulsgenerator

Bei den Druckwellen-/Impulsverfahren, die auf der Basis der Wasser- oder Luftkomprimierung arbeiten, wird Energie zur Erzeugung der Druckwellen durch Kompression von Gas oder Wasser in einem definierten Gefäß aufgebaut und durch einen spezifischen Mechanismus impulsartig entspannt, so dass daraus eine sich allseitig ausbreitende Druckwelle entsteht. Die **Abbildung 2-6** veranschaulicht diese Technik schematisch.



**Abb. 2-6:** Schematische Darstellung des Impulsgeneratorprinzips

Im Merkblatt „W 130“ ist dem Druckwellen-/Impulsverfahren auf der Basis von Wasser- oder Luftkomprimierung folgendes bestätigt:

- Rohrrinnenwand, Filterschlitz, Kiesschüttung und anstehende Bodenformation gehören zum Arbeitsbereich,
- Umlagerung und Veränderung der Kiesschüttung möglich.

Die Aufgabe der F/E-Arbeit bestand in der Beschreibung der genannten Druckwellen und deren Dämpfung bei der Ausbreitung aus dem Brunnen. Die Auslösung von Strömungsprozessen wurde dem Impulsgenerator von vornherein abgesprochen und war damit auch nicht Gegenstand der F/E-Aufgabe.

## **2.5.4      Ultraschallgeber**

Die Technologie der Ultraschallverfahren baut auf der Hypothese auf, dass sich auf der Basis einer hochfrequenten Schwingung Körper unterschiedlicher Dichte trennen können.

Auf dem deutschen Markt sind dabei zwei unterschiedliche Techniken zur Erzeugung des Ultraschalls im Einsatz. Beide Varianten der Ultraschallgeneratoren sollten in den Versuchsanlagen im Rahmen dieser Arbeit getestet werden.

Im Merkblatt „W 130“ ist der Technologie folgendes bestätigt:

- der Arbeitsbereich dieser Technologie liegt in der Kiesschüttung,
- die Beanspruchung des Ausbaumaterials ist gering,
- der Einsatz der Sonden erfordert eine Vorreinigung der Rohrwand und der Filterschlitz.

Das Ziel der Testung sollte in der Erfassung und Bewertung der Druckwellen sein, die die Ultraschallgeber als Dauerschwingungen zu erzeugen vermögen und in welcher Form die Dämpfung der Wellen bei der Ausbreitung von Brunnen erfolgt. Die Erzeugung von Strömungsmessern ist bei den UV-Gebern von vornherein ausgeschlossen.

## **2.5.5      Mehrkammergerät**

Bei der Regenerierung von Brunnen mit Regeneriermitteln (chemische Regenerierverfahren) nutzen die Regenerierer vorwiegend Mehrkammergeräte, um ausgewählte Abschnitte des Filterrohres mit einem Wasser-/Regeneriermittel-Gemisch zu spülen, indem das Fluid, das die Beläge zu lösen bzw. abzulösen vermag, umgewälzt wird (Kreislaufbetrieb mit wechselnden Fließrichtungen).

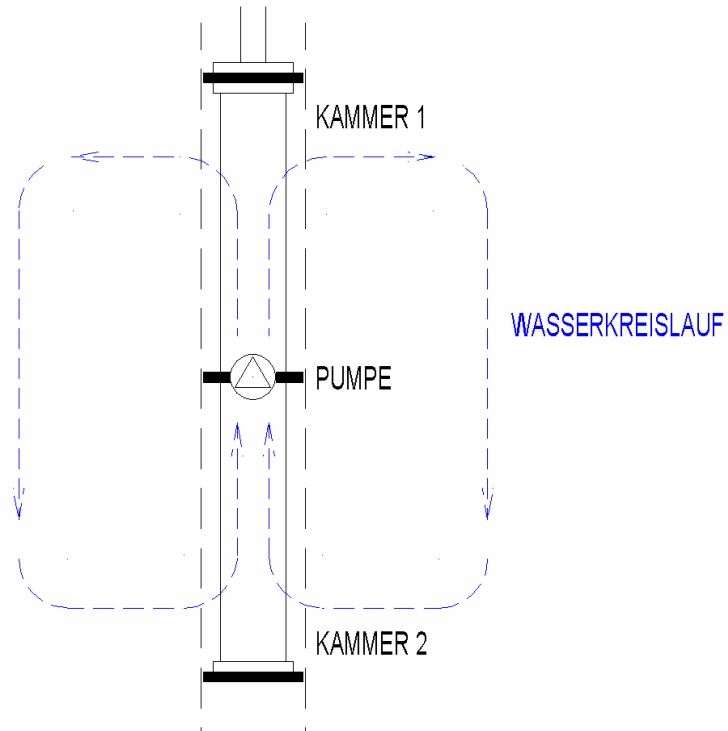
Im Merkblatt „W 130“ wird den Mehrkammergeräten folgendes bescheinigt:

- Filterschlitz, Kiesschüttung und angrenzende Bodenformation gehören zum Arbeitsbereich,
- niedrige bis mittlere Regenerieverluste infolge der kontrollierten Fließprozesse.

Im Rahmen der F/E-Aufgabe sollte zumindest eines der Mehrkammergeräte in der VA 2 im Hinblick auf Gestalt und Größe des erreichbaren Strömungsfeldes getestet werden.

Ergänzend sollte das Strömungsfeld im mathematischen Modell ermittelt werden.

Die **Abbildung 2-7** veranschaulicht das Wirkprinzip eines Mehrkammergerätes.



**Abb. 2-7:** Schematische Darstellung der Wirkung eines Mehrkammergerätes

### **3 Testanlagen**

#### **3.1 Versuchsanlage 1**

##### **3.1.1 Rahmenbedingungen**

Der Brunnenprüfstand BPS 1, Masch.-Nr. 348, Baujahr 1996, der die Versuchsanlage 1 (VA 1) der F/E-Aufgabe bildete, wurde aus dem Inventar der Firma E+M Bohr GmbH unentgeltlich zur Nutzung überlassen. In der kostenlosen Ausleihe waren auch die Aufrüstung der Anlage mit einer Hebeeinrichtung und der Transport ins Technikum des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e. V. einbegriffen. Die E+M Bohr GmbH erreichte mit dieser Zuwendung eine Stützung des Eigenmittelfonds des Zuwendungsempfängers.

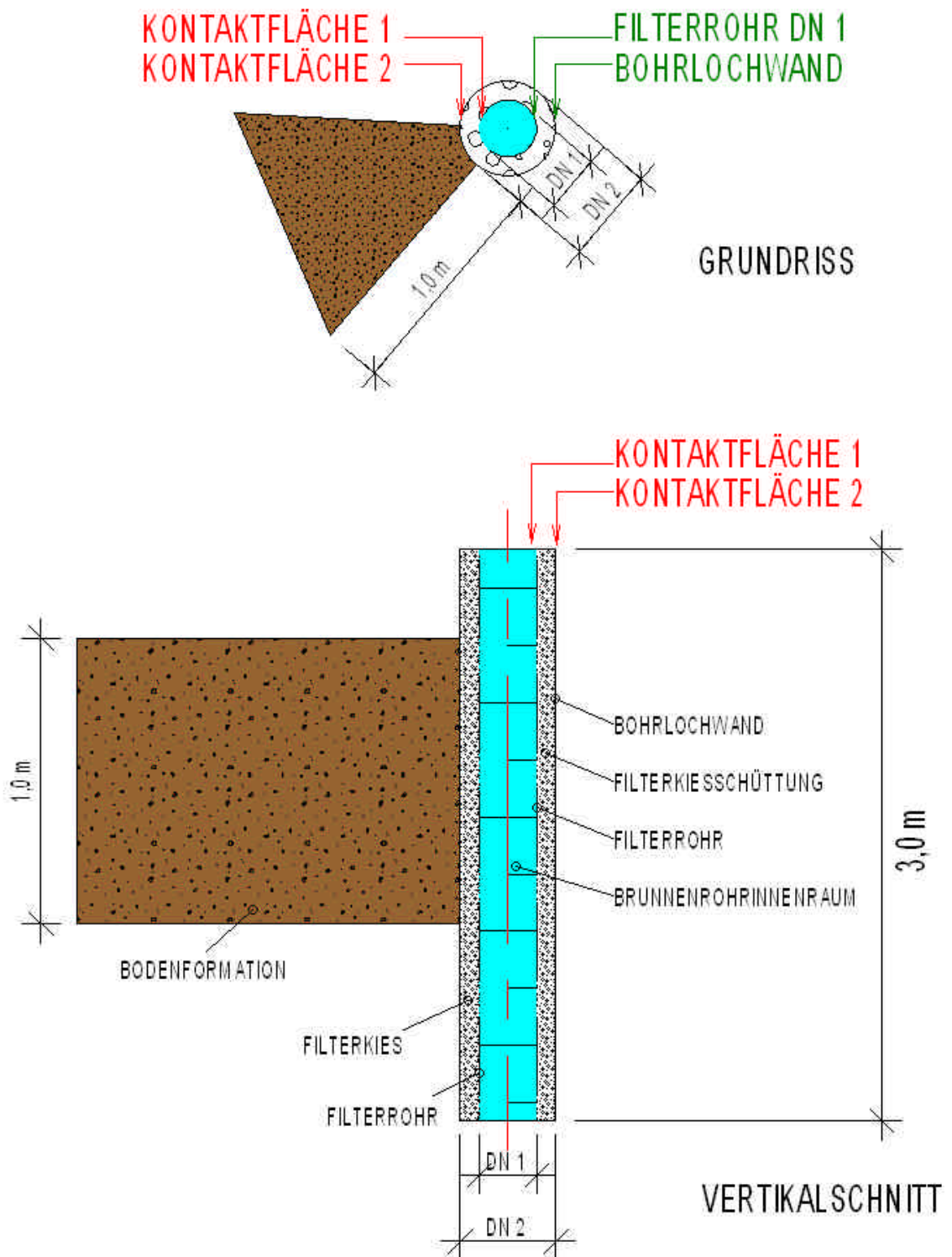
Der Eigentümer der Anlage erklärte sich bereit, diese Anlage im Technikum zu belassen und für weitere Tests von Geräten kostenfrei zur Verfügung zu stellen. Im Falle einer Fortführung der F/E-Aufgabe könnte damit auf diese Gerätetechnik aufgebaut werden.

##### **3.1.2 Bauliche Gestaltung**

Die VA 1 besteht vom Grundsatz her aus zwei unterschiedlichen Elementen. Das Grundelement bildet ein Zylinder mit einem Durchmesser von  $D = 0,5$  m und einer Höhe von  $H = 3,0$  m, der den Brunnen repräsentieren soll. An das Grundelement ist ein keilförmiges Außensegment angehängt, das das Umfeld des Brunnens, den Grundwasserleiter, in einem ausgewählten Bereich des Naturraumes symbolisiert. Die Höhe des Außensegmentes beträgt ca. 1,0 m und die Länge ca. 1,0 m. Die **Abbildung 3-1** veranschaulicht den Aufbau der VA 1 schematisch.

Für die VA 1 wurde ein frostsicheres Fundament errichtet. Der Aufbau der Anlage wurde noch im Jahr 1999 abgeschlossen.

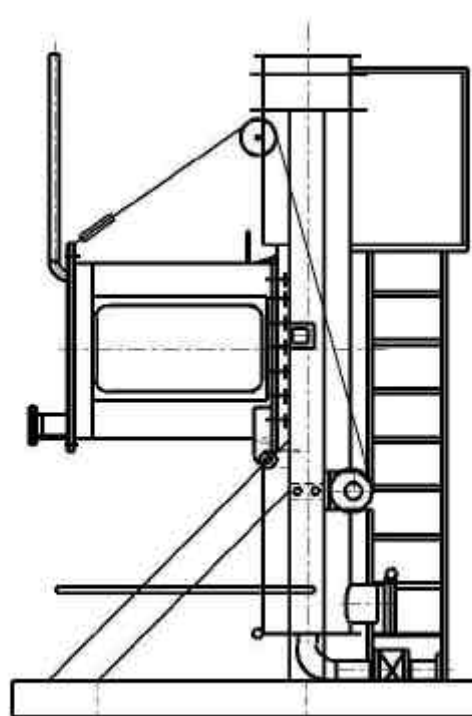
In der ersten Version wurde das Grundelement mit einem Wickeldrahtfilter DN 250, Schlitzweite 2 mm und Ottendorfer Filterkies der Körnung 3,15 ... 5,6 mm ausgestattet. Nach Abschluss der Vorversuche erfolgte eine Umrüstung des Ausbaues mit einem Wickeldrahtfilter DN 300, Schlitzweite 0,7 mm und Dörfner Filterkies der Körnung 3,15 ... 5,6 mm, da der Ottendorfer Kies den Anforderungen der Versuchsanlage (Belastung aus den Eigenschwingungen der Anlage) nicht gewachsen war.



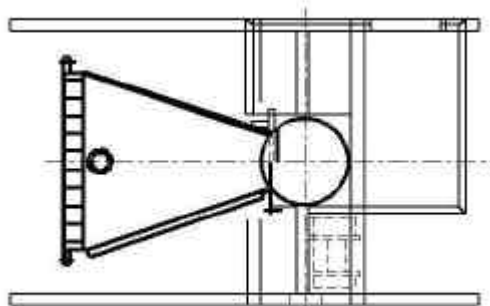
**Abb. 3-1:** Versuchsanlage 1 – schematische Darstellung der Funktionselemente

Das keilförmige Außensegment ist vom Grundelement abklappbar. Im abgeklappten Zustand bietet es eine ausreichende Öffnung zum Einbau des Erdstoffes und der erforderlichen Messtechnik. Als Material zur Schaffung des natürlichen Umfeldes für den Brunnen wurde natürliches Material des Elbtalgrundwasserleiters eingebaut.

Die **Abbildung 3-2** zeigt den schematischen Aufbau der Anlage mit der stabilisierenden Hilfskonstruktion, die gleichzeitig als Bediengerüst genutzt wurde.



Seitenansicht



Draufsicht

**Abb. 3-2:** VA 1 - schematische Darstellung der Gesamtanlage

### 3.1.3 Testaufgaben

Ausgehend von der baulichen Gestalt erschien die VA 1 dafür geeignet, zum einen die Strukturänderungen (Auflockerungen/Verdichtungen) im „geschütteten“ Bereich (Filterkies) und der „natürlichen“ anstehenden Bodenformation, die als Wirkung der Druckwellen/Impulsverfahren zu erwarten waren, zu erfassen und zum anderen die Dämpfungen der Druckwellen bei ihrer Wanderung vom Brunnen in das Umfeld als Nachweis der wirksamen Eindringtiefe zu messen.

Für die Bewertung von Strömungsprozessen der zu testenden Gerätetechnik erschien die VA 1 infolge ihrer baulichen Gestalt für ungeeignet, obgleich die Anlage über einige Möglichkeiten zur Potenzialfassung verfügte.

### 3.1.4 Messtechnik

Für den Nachweis der Strukturänderung wurde die geo-elektrische Widerstandsmessung gewählt, nachdem im Labortest die dafür entwickelten und hergestellten Aufnehmersonden sich als geeignet erwiesen hatten.

Bei dem geo-elektrischen Widerstandsmessverfahren werden dem Umfeld der Messsonden elektrische Gleich- oder Wechselstromfelder aufgeprägt und aus Stromstärke und elektrischer Potentialdifferenz (Spannung) der elektrische Widerstand und seine Verteilung ermittelt. Stromeinspeisung und Spannungsabgriff erfolgen hierbei galvanisch. Aus den Messgrößen Stromstärke  $I$  [A] und Spannung  $U$  [V] können die Auswerteparameter OHMscher Widerstand  $R$  [ $\Omega$ ] bzw. der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] ermittelt werden. Zwischen diesen Größen bestehen folgende Beziehungen:

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{OHMsches Gesetz} \quad (4/1),$$

$$\text{bzw.} \quad \rho = K \cdot R \quad (4/2).$$

$K$  ist hierbei ein „Konfigurationsfaktor“ mit der Maßeinheit [ $\text{m}^2/\text{m}$ ], der die Geometrie des vom Strom durchflossenen Raumes beschreibt.

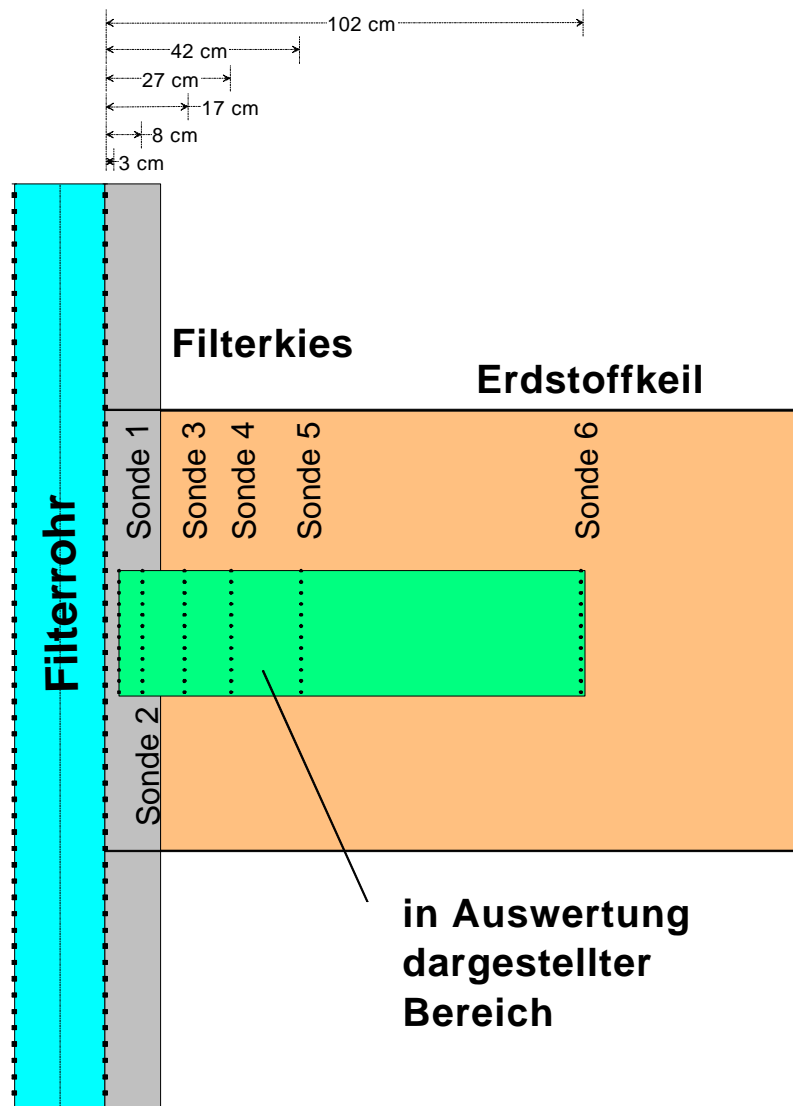
Der elektrische Widerstand im betrachteten System ist von folgenden Parametern abhängig:

- Leitfähigkeit des Porenwassers,
- Wassersättigung,
- Porosität des Bodens.

Im vorliegenden Messfall war die Porosität der einzige Parameter, der Veränderungen infolge der Verfahrensanwendung erwarten ließ.



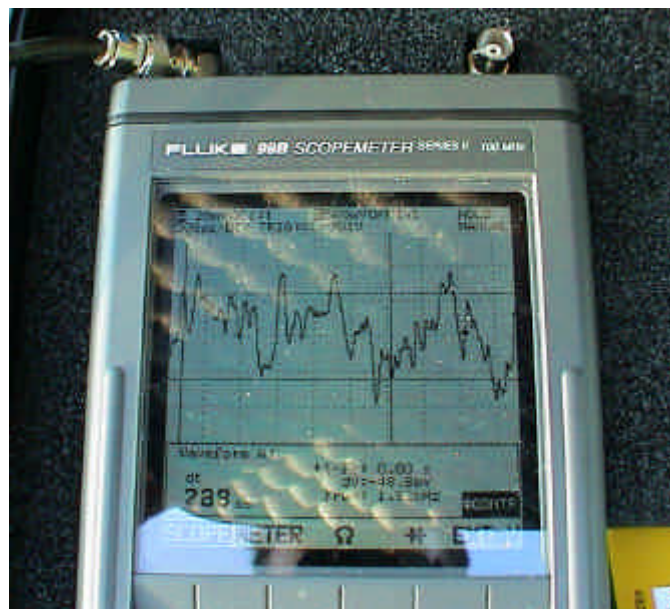
Die Messsonden wurden in abgestufter Entfernung vom Filterrohr im Erdstoff (4 Stück) bzw. im Filterkies (2 Stück) eingebaut. Die Anordnung der Sonden in Bezug auf den Filter ist in **Abbildung 3-3** dargestellt.



**Abb.: 3-3** Anordnung der geo-elektrischen Messsonden in der VA 1

Als Methode zur vergleichenden Betrachtung der Druckwellen-/Impulsverfahren erschien nach umfänglicher Recherche letztlich die Erfassung der Frequenzen und Amplituden der von den Geräten abgestrahlten Druckwellen geeignet. Hierzu war der Einbau von Impulsaufnehmersonden in die Versuchsanlage notwendig. Vor dem Erwerb und dem Einbau für die spezielle Aufgabe geeigneten Messtechnik in die Versuchsanlage wurden Tests der Schwingungsaufnahme durchgeführt.

Die Messwertvisualisierung und -auswertung erfolgte mit einem Messgerät, welches zur Datenspeicherung und zur weiteren Auswertung der Messdaten an einen PC angeschlossen werden kann. Die **Abbildung 3-4** zeigt ein Beispiel der mit dem Auswertegerät gemessenen Schwingung.

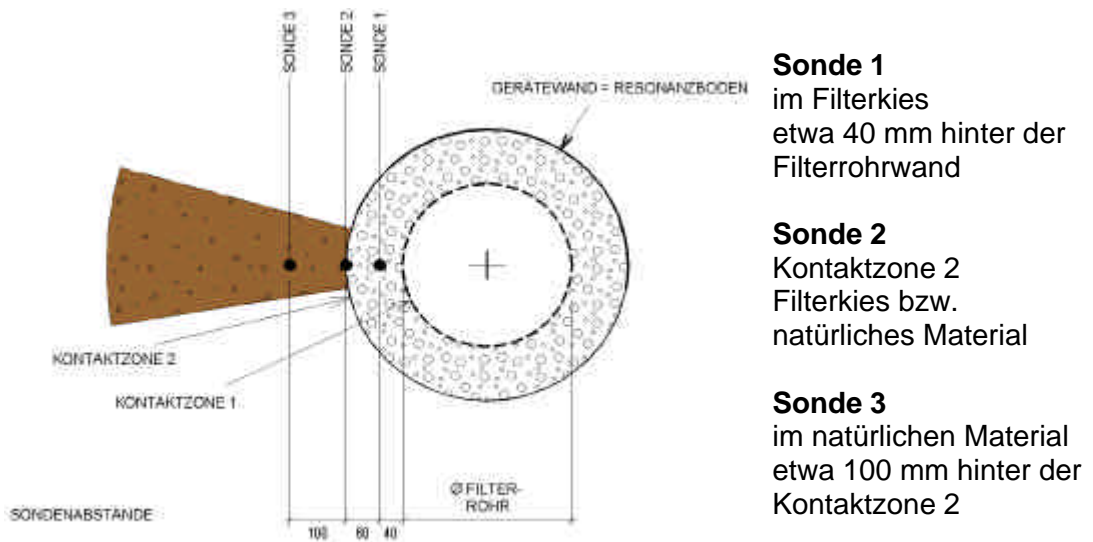


**Abb.: 3-4** Impulswellenerfassung und -auswertung

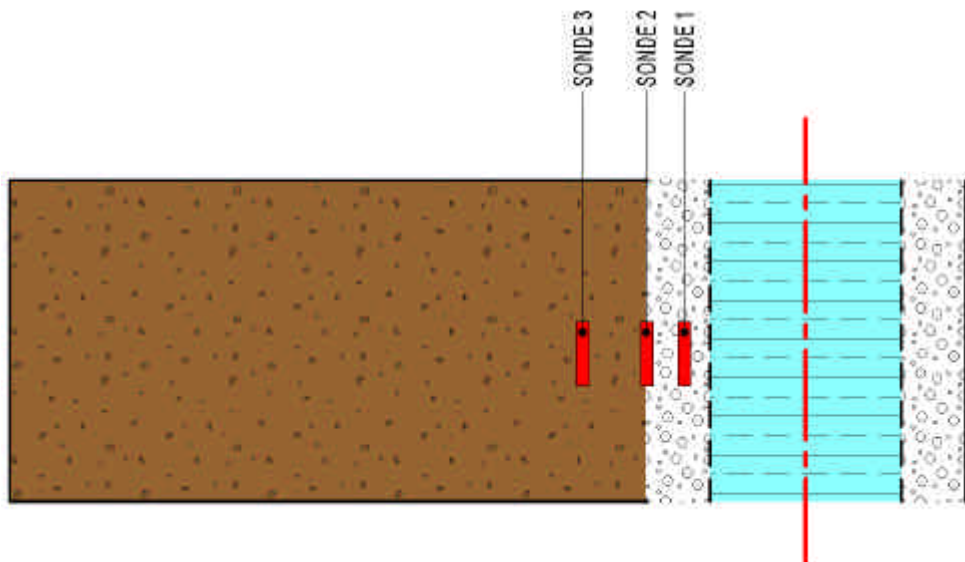
Nach der erfolgreichen Durchführung des Tests wurde die Versuchsanlage mit der erforderlichen Messtechnik ausgestattet. An die zu installierenden Schwingungsaufnehmer waren folgende Anforderungen gestellt:

- druckwasserdichte Ausführung,
- Frequenzbereich ca. 20 Hz bis 50 kHz,
- Druckbereich bis ca. 10 bar.

Aus der Vorbemessung zu den Laufzeiten der Schwingungen wurde die in den **Abbildungen 3-5** und **3-6** dargestellte Anordnung der Sonden realisiert.



**Abb. 3-5:** Anordnung der Frequenzmesssonden (horizontaler Schnitt)



**Abb.: 3-6** Anordnung der Frequenzmesssonden (vertikalebener Schnitt)

Die Schwingungsaufnehmer erfassen die auf sie wirkenden Beschleunigungen einer Druckwelle und wandeln diese in einen Spannungswert, der mit entsprechenden Geräten zur Datenerfassung aufgezeichnet werden kann. Bei den gewählten Messsonden gilt als Gerätekonstante

$$101 \text{ mV} \hat{=} 1 \text{ g (Endbeschleunigung)}.$$

Im Messgerät zur Datenerfassung erfolgt mit den Messdaten der Beschleunigung (a) eine Frequenzanalyse mit dem Ausweisen der Hauptfrequenz (f). Da es sich bei dem eingesetzten Messgerät um ein zweikanaliges Gerät handelt, konnten jeweils zwei Messsonden gleichzeitig erfasst werden.

Beschleunigung und die Hauptfrequenz stellen damit für die Beurteilung der von den einzelnen Geräten erzeugten Druckwellen

### Messwerte

dar, die untereinander vergleichbar sind, da die Position der Sonden bei allen Tests gleich gewählt werden.

Im Weiteren ist es möglich, die Wegamplitude der Druckwellen  $x_{\max}$  der einzelnen Verfahren zu vergleichen. Für die Auslenkung (Weg) x gilt das mathematische Modell

$$x = \frac{a}{\omega^2} = \frac{a}{(2\pi f)^2}$$

und für die Amplitude  $x_{\max}$

$$x_{\max} = \frac{a_{\max}}{\omega^2}$$

Da in diesem Ansatz die Frequenz im Quadrat eingeht, ist vom Grundsatz her zu erwarten, dass die niederfrequenten Druckwellen größere Wegamplituden erwarten lassen, als die Druckwellen, die hochfrequente Wellen nutzen.

Als Parameter zur Beschreibung der Schwingungen kann auch die Schwinggeschwindigkeit abgeleitet werden. Es gilt hierfür der mathematische Ansatz

$$v = \omega \cdot x = 2\pi f \cdot x$$

bzw.

$$V_{\max} = \omega \cdot X_{\max},$$

der im Weiteren für den Nachweis der Energie genutzt wird, die auf die Kies- bzw. Bodenkörnung einwirkt und damit eine Teilchenbewegung auszulösen vermag.

Eine Druckwelle besitzt als mechanische Welle sowohl kinetische Energie, die an die Trägheit der bewegten Masseteilchen, als auch potentielle Energie, die an die elastischen Eigenschaften des Mediums gebunden ist. Die Verhältnisse der

Energieanteile ändern sich in Abhängigkeit von der Position des Teilchens. Erreicht die kinetische Energie den Maximalwert, besitzt der Anteil der potentiellen Energie den Wert Null.

Es gilt:

- kinetische Energie

$$E = \frac{m}{2} v_{\max}^2$$

- spezifisch kinetische Energie, bezogen auf die Bodenmasse

$$\frac{E}{m} = \frac{1}{2} v_{\max}^2$$

Letztlich soll der Parameter  $\frac{E}{m}$  als ein entscheidendes Kriterium für die Beurteilung des Wirkungsbereiches einer Druckwelle im Filterkiesbereich bzw. im natürlichen Material sein, da nur dort, wo ein Energieeintrag nachgewiesen wird, auch eine Wirkung im Hinblick auf die Trennung von Trägermaterial (Kies, Sand, Filter) und Belägen/Ablagerungen möglich sein sollte.

## **3.2 Versuchsanlage 2**

### **3.2.1 Rahmenbedingungen**

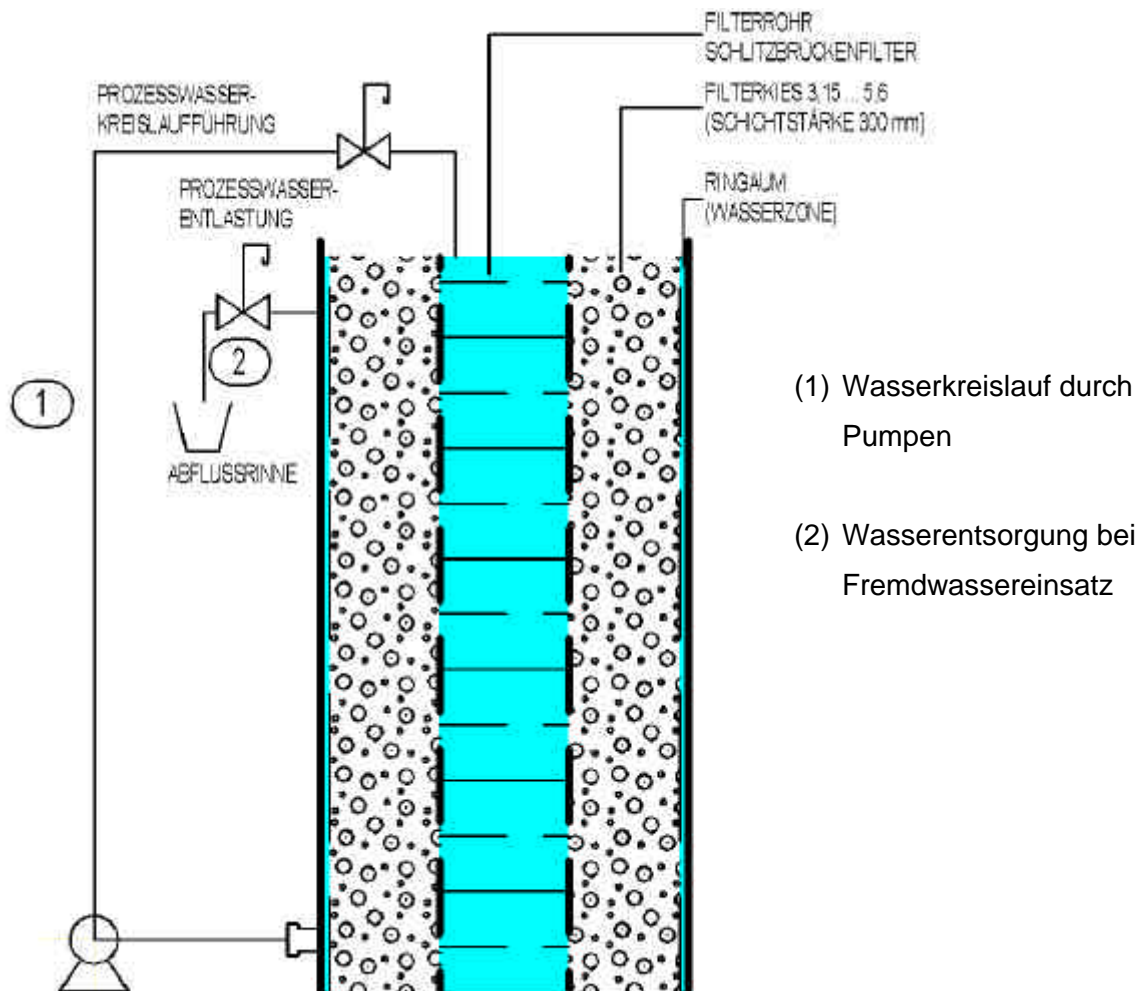
Der Teststand, der die Versuchsanlage 2 (VA 2) der F/E-Aufgabe bildete, wurde aus dem Grundmittelbestand der Firma IBB Ingenieur- und Beratungsbüro für Brunnenbetriebstechnik und –instandhaltung GmbH Berlin kostenfrei beigestellt, so dass zunächst nur der Transport der Anlage von Berlin nach Dresden in das Technikum des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e. V. (DGFZ) als Aufwand der Forschung anfiel. IBB betrachtet die Beistellung der VA als Zuwendung im Sinne der Forschungsförderung und stützte damit den Eigenmittelanteil des Zuwendungsempfängers.

Mit der Überlassung des Grundmittels stünde damit im Technikum des DGFZ e. V. die VA 2 auch künftigen F/E- bzw. Zertifikatuntersuchungen zur Verfügung. Da die VA auf dem Freigelände des Technikums installiert sind, beschränkt sich die Nutzungszeit, wie bei der VA 1, auf das Sommerhalbjahr.

### 3.2.2 Bauliche Gestaltung

Die VA 2 (Säulenanlage) besteht aus einem aufrecht stehenden Zylinder mit einem Durchmesser von 1,0 m und einer Höhe von 3,0 m. Der Zylinder ist am unteren Ende mit einem Boden verschlossen und oben offen. Die Säule kann mit Filterrohr, Filterkies und Erdstoff ausgebaut werden. Für den Ausbau der Säule und für die geplanten Messungen wurde um den Zylinder ein Gerüst gebaut.

Für die F/E-Aufgabe wurde die Anlage mit einem Schlitzbrückenfilter DN 350, Schlitzweite 1,5 mm und einer einfachen Schüttung von Filterkies des Kieswerkes Ottendorf-Okrilla der Kornabstufung 3,15 ... 5,6 mm bestückt. Die **Abbildung 3-7** veranschaulicht schematisch die Funktionselemente.



**Abb. 3-7:** Versuchsanlage VA 2 - Funktionselemente

### 3.2.3 Testaufgabe

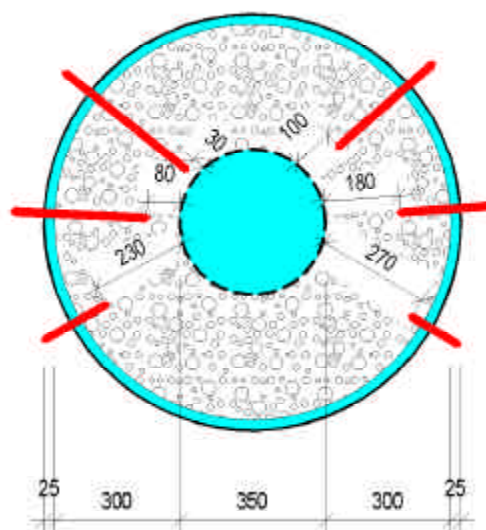
Mit dieser Säulenanlage sollten die Strömungsverhältnisse dargestellt werden, die sich beim Einsatz von Regeneriertechnik hinter dem Filterrohr ergeben.

Bei der gewählten Versuchsanordnung wurde die Mächtigkeit der Filterkiesschüttung mit 300 mm im Vergleich zum realen Brunnenbau unverhältnismäßig groß gewählt. Hintergrund für diese Wahl war, dass sowohl den Hochdruck-Innenspültechniken als auch teilweise den Druckwellen-Impulsverfahren eine deutliche Druckentwicklung in der Filterkiesschüttung zugetraut wurden, so dass der Aufbau großer Strömungsfelder zu erwarten war. Um die absolute Tiefenwirkung solcher Prozesse zu erfassen und um dabei Einflüsse von Schichtgrenzen im Sinne des Vergleichs zu unterdrücken, wurde im Rahmen dieser Arbeit auf reale Kiesschüttungsstärken verzichtet.

Der Einfluss der Schichtgrenze sollte im Nachhinein durch mathematische Simulation ermittelt werden.

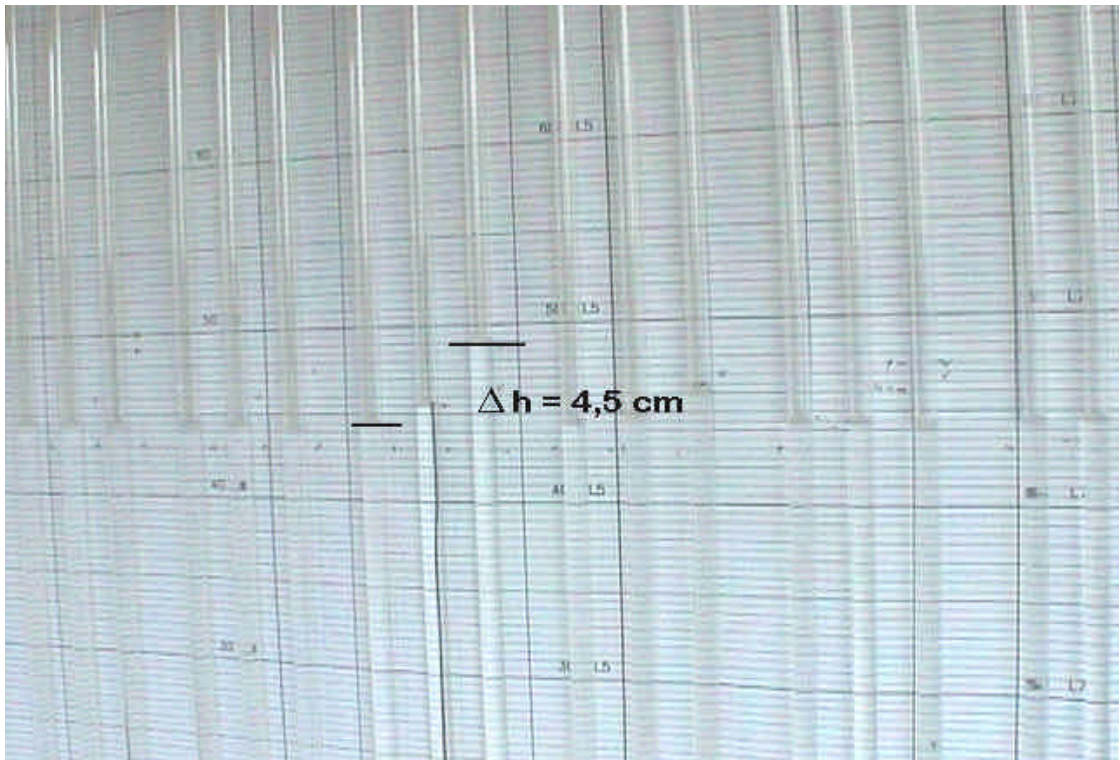
### 3.2.4 Messtechnik

Zur Erfassung der Potenzialverhältnisse sind in 11 Ebenen im Bereich von 1,0 m bis 2,25 m vom Boden der Säule jeweils 6 Druckaufnehmer mit unterschiedlichem Abstand zum Filterrohr installiert worden. Mit den über diese Aufnehmer ermittelten und auf eine Potenzialharfe übertragenen Druckverhältnissen lässt sich das Strömungsbild im betrachteten Bereich widerspiegeln. Die **Abbildung 3-8** veranschaulicht die Lage der Potenzialaufnahme, wie sie bei der Lösung dieser Aufgabe genutzt wurde.



**Abb.: 3-8** Potenzialaufnahme bei dem Test in der VA 2

Die Messung der Drücke erfolgte über die Auswertung der erreichten Wasserspiegellage in der Potenzialharfe. Die **Abbildung 3-9** veranschaulicht eine solche Messung exemplarisch.



**Abb. 3-9:** Realaufnahme der Potenzialharfe



## 4 Testprogramm

### 4.1 Rahmenbedingungen

Für die Tests im Technikum Dresden wurden im Vorfeld mit der Projektbegleitgruppe folgende Grundsätze vereinbart:

- Bei der **Versuchsanlage 1** (VA 1) sind konstruktive Voraussetzungen gegeben, die es gestatten, die Anlage vor jedem Test mit vertretbarem Aufwand neu zu beschicken und nach vorgegebenen Kriterien neu zu verdichten. Dieser Aufwand erschien sinnvoll, da die Vortests gezeigt hatten, dass bei Druckwellen-/Impulsverfahren deutlich nachweisbare Setzungen auftraten. Durch die Neubeschickung vor jedem Test hatten alle Tests die gleichen Rahmenbedingungen.

#### Festlegung:

Da die Neubeschickung der VA 1 einen hohen manuellen Aufwand erfordert, wird auf eine Variation der Filterrohre verzichtet.

- Da die Messgeräte, sowohl innerhalb der Filterkiesschüttung als auch in der anstehenden Bodenformation infolge ihrer Abmessungen Anomalien darstellten, sollte stets nur ein Satz von Messgeräten eingebaut werden, d. h. die Messungen der Verdichtung erfolgten unabhängig von den Tests der Schwingungsmessungen. Die Umsetzung dieser Forderung erforderte den Mehrfacheinsatz der zu prüfenden Technik. Der Mehraufwand wurde im Hinblick auf eine erhöhte Aussagegenauigkeit akzeptiert.

#### Festlegung:

Das volle Programm der Nachweise erfordert einen Doppeleinsatz der Technik und sollte zumindest bei allen Geräten angestrebt werden.

- In der **Versuchsanlage 2** (VA 2), wo es galt, die Strömungsfelder zu ermitteln und in welcher nur Filterkies eingebaut war, wurde letztlich auf den Materialaustausch verzichtet. Mit diesem Verzicht wurde der konstruktiven Gestalt der VA 2 (keine Entleerungseinrichtung) Rechnung getragen. Der Verzicht konnte damit legitimiert, dass durch eine sehr hohe Verdichtung vor Beginn der entscheidenden Testserien, Dichteänderungen nicht mehr nachweisbar waren.
- Durch den Einbau von ungealtertem Material waren die Tests auf die Erfassung von physikalischen Messgrößen unter gleichen Rahmenbedingungen ausgerichtet. Ein realer, aber im Wesentlichen theoretische Vergleich der Messgrößen der unterschiedlichen Geräte war damit gegeben.

Ein Übertrag auf natürliche Bedingungen ist durch die gewählte Rahmenbedingung nur von der Tendenz her möglich.

## 4.2 Vorarbeiten/Testprogramm

Der Zeitraum der vorbereitenden Arbeiten, in dem die Fundamente für die Großversuchsanlage gefertigt wurden, der Antransport der Anlage aus Hof und Berlin erfolgte, die Nachrüstung der Versuchsanlagen, die Ausrüstung und die Beschickung der Versuchsanlagen begann in der

**27. KW 2000**

und nahm einen Zeitraum bis zur

**44. KW 2000**

in Anspruch. Der erste Nulltest an der **VA 1** wurde in der

**48. KW 2000**

gefahren. Nach der Winterpause erfolgte die Vorbereitung der out-door-Tests, die mit der

**19. KW 2001**

begannen, da sich zu diesem Zeitpunkt die erste Gruppe von Regenerierern zu diesen Tests bereiterklärt hatte.

Mit der zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Gerätetechnik wurde Nulltests gefahren. Diese Nulltests erforderten dann noch einen relativ großen Zeitraum, so dass erst in der

**22. KW 2001**

mit dem eigentlichen Test der realen Gerätetechnik (Testserie 1) unter definitiven Bedingungen begonnen werden konnte.

Parallel zu diesen Arbeiten erfolgte die nicht einfache Planung des Geräteinsatzes, wobei es galt, die Regenerierfirmen zu einer zweitägigen, kostenlosen Demonstration bzw. Testung im Technikum Dresden zu überzeugen.

Nach der Lieferung der Messgeräte für die Schwingungsmesstechnik und deren Einbau in die VA 1 in der

**33. KW 2001**

konnten die Vorarbeiten endgültig als abgeschlossen betrachtet werden und die Testserie 2 beginnen.

## 4.3 Realisierte Tests

### 4.3.1 Niederdruckspülgerät

Als Vertreter der Niederdruckspültechnik wurde ein Spülkopf der Brunnenbau Wilschdorf GmbH getestet. Nach einem Funktionstest im Pumpentestbecken in Wilschdorf erfolgte der Einsatz in den Versuchsanlagen des Technikums. Für den Test wurde der Spülkopf vom Typ „**NDSK 300**“ mit einer Grundfos-Unterwasserpumpe gekoppelt.

Der Spülkopf arbeitete mit einer Wassermenge von ca.  $Q = 90 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem Förderdruck von ca. 1,5 bar.

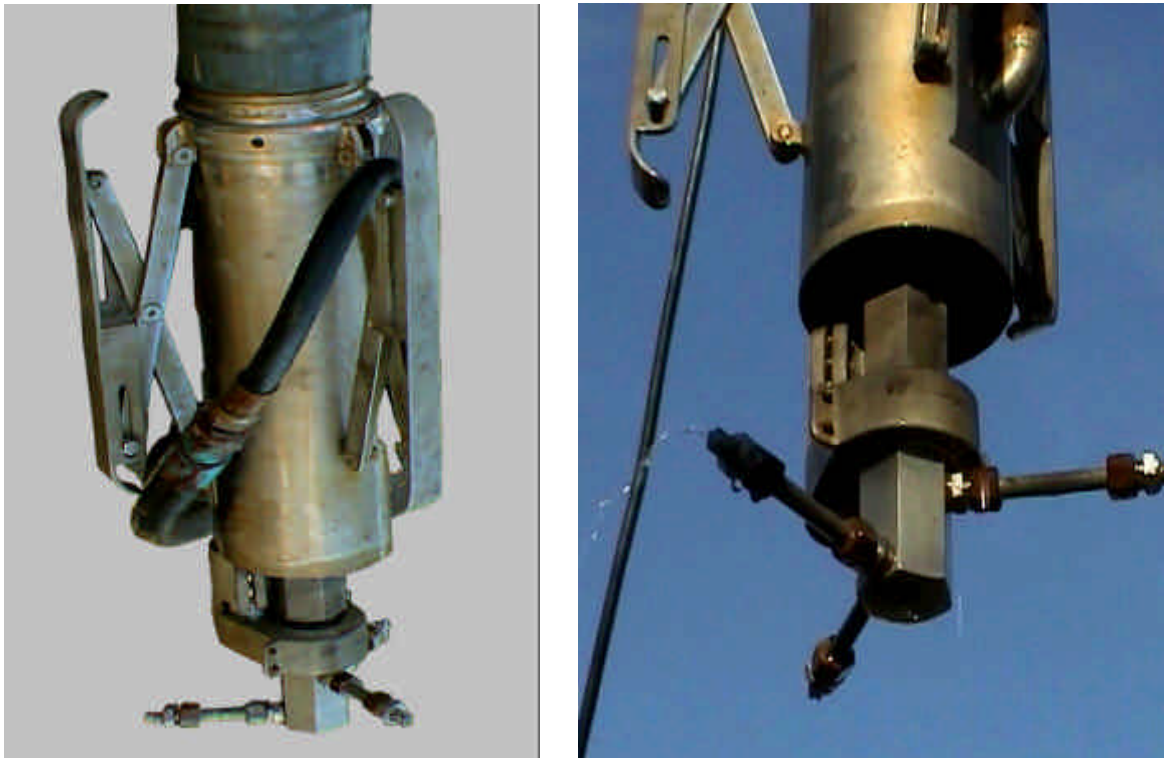
Bei 30 Düsen mit einem Durchmesser von 10 mm beträgt die Austrittsgeschwindigkeit ca.  $v = 10$  bis 11 m/s. Im Feldeinsatzfall, d. h. unter Praxisbedingungen, nutzt man solche Pumpen, die eine Strahlgeschwindigkeit von 15 bis 20 m/s erzeugen. Der Einsatz der originalen Spülkopf/Pumpen-Kombination in den Versuchsanlagen scheiterte an der Baulänge der Pumpen. Die Technik wurde sowohl in der Versuchsanlage 1 als auch in der Versuchsanlage 2 eingesetzt (s. **Abbildung 4-1**).



**Abb. 4-1:** Realaufnahme des Spülkopfes NDSK 300  
a) Testgerät  
b) Einbau der Spülkopf/Pumpe-Kombination bei den Vortests

### 4.3.2 Hochdruckspülgeräte

Als erster Vertreter des Verfahrens der Hochdruckinnenspülung wurde das Hydraulik-Rotations-Hochdruck-Regeneriergerät (HRH) der Firma Aqua Brunnen Service Regenerierungstechnik GmbH München getestet (s. **Abbildung 4-2**).



**Abb. 4-2:** HRH-Aggregat für Hochdruckinnenspülung von ABS

Bei diesem Gerät befinden sich am zwangsgetriebenen rotierenden Spülkopf 3 Düsen, die einen Hochdruckwasserstrahl auf die Innenseite des Filterrohres richten. Die Druckerzeugung erfolgt außerhalb des Brunnens. Während der Regenerierung ist der Arbeitsdruck in einem weiten Bereich (ca. 50 – 240 bar) regulierbar. Die Spülung erfolgt mit einer Wassermenge von bis zu etwa 5,4 m<sup>3</sup>/h. Der Düsendurchmesser kann an die spezielle Aufgabe angepasst werden und liegt im Allgemeinen zwischen 1 und 3 mm. Bei der Arbeit des Gerätes erfolgt gleichzeitig eine Wasserentnahme aus dem Brunnen.

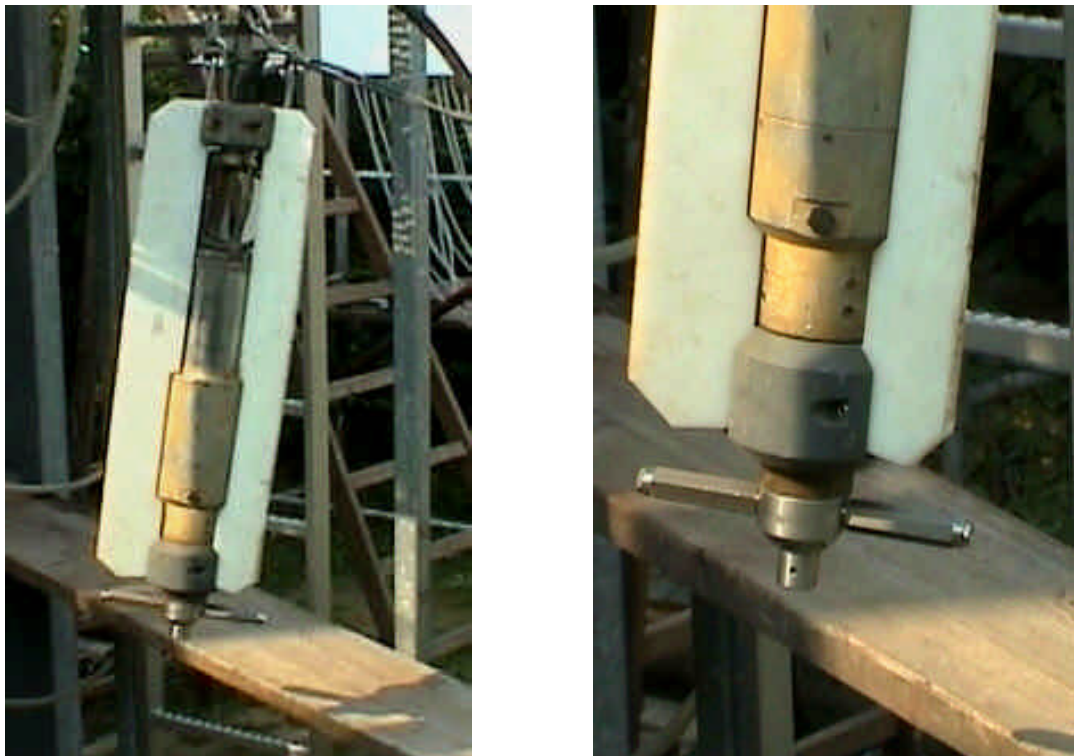
Die Drehrichtung und Drehgeschwindigkeit des Rotationsdüsenkopfes wird überwacht, ist regulierbar und beträgt bis zu 60 U/Min. Die Entnahme erfolgt bei diesem Anbieter am Reinigungsgerät, unmittelbar über dem Rotationsdüsenkopf. Die Entnahmemenge beträgt im Allgemeinen 3 l/s, kann aber je nach zu regenerierendem Brunnen auf bis zu etwa 8 l/s gesteigert werden. Generell wird

die doppelte Menge im Verhältnis zur zugegebenen Spülmenge abgepumpt, so dass effektiv bei der Arbeit mit dem HRH aus dem Brunnen eine Wassermenge von 5 m<sup>3</sup>/h entnommen wird.

Dieses Reinigungsgerät wurde in beiden Versuchsständen eingesetzt. Da als primäres Wirkprinzip bei diesem Verfahren die Trennung der gebundenen Ablagerungen durch die Scherkraft des strömenden Wassers erwartet wurde, erfolgte die Ermittlung der mit diesem Gerät initialisierten Strömungsverhältnisse in der Versuchsanlage 2 bei einem Druck von 50 bar, 100 bar und 150 bar an der Erzeugereinheit.

Beim Test des Gerätes in der VA 1 wurde registriert, dass beim Hochdruck-Innenspülverfahren auch Schwingungen entstehen. Die Erfassung dieser Schwingungen erfolgte bei unterschiedlichen Drücken von 50 bis 175 bar.

Als zweiter Vertreter der Hochdruck-Innenspülung wurde der WELLJET der Firma AQUAPLUS Brunnensanierung H. Mundig GmbH & Co. KG Kronach in den Versuchsanlagen getestet (s. **Abbildung 4-3**).



**Abb. 4-3:** Welljet-Aggregat der Fa. AQUAPLUS für Hochdruckinnenspülung

Dieses Gerät besteht im Wesentlichen aus einem Düsenpaar, welches über einen Motor mit variabler Drehzahl zwangsgetrieben rotiert. Die Drehzahl kann hierbei etwa in den Grenzen von 10 bis 200 U/Min. variiert werden. Es erfolgt eine permanente Drehzahlüberwachung. Auch bei diesem Gerät erfolgt die Druckerzeugung außerhalb des Brunnens. Der Druck kann entsprechend den Brunnenbedingungen reguliert werden und bis etwa 300 bar an der Erzeugereinheit betragen. Die während des Spülprozesses eingesetzte Wassermenge beträgt etwa 1,5 l/s (5,4 m<sup>3</sup>/h). Im Allgemeinen kommen Düsen mit einem Öffnungsdurchmesser von 1 bis 3 mm zum Einsatz.

Der Austrag der gelösten Ablagerungen erfolgt mit einer separaten Förderpumpe, die oberhalb des Reinigungsgerätes im Brunnen installiert wird und etwa die doppelte Menge des Spülwassereintrages abfördert.

Auch dieses Verfahren wurde in beiden Versuchsständen zum Einsatz gebracht. In der Versuchsanlage 2, in der die Potenzial- und Strömungsverhältnisse erfasst werden, wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit wechselndem Druck (zwischen 150 bis 300 bar) und unterschiedlichen Drehzahlen (10 bis 100) absolviert.

In der Versuchsanlage 1 wurden zur Schwingungserfassung Messreihen mit Drücken von 100 bis 250 bar und Drehzahlen von 60 bzw. 150 U/Min. aufgenommen.

### 4.3.3 Doppelrotationsaggregat

Die Regenerieranlage JET Master der Firma E+M Bohr GmbH Hof nutzt als Druckwellenerzeuger ein Doppelrotationsaggregat. Das Gerät erzeugt durch die rückstoßgetriebene Rotation zweier gegenläufiger Düsenpaare mit sehr hoher Drehzahl permanente Druckimpulse, die im Brunnen und brunnennahen Raum wirken (s. **Abbildung 4-4**).

Der Hochdruck des die Düsen treibenden Strahles wird außerhalb des Brunnens erzeugt und kann in Abhängigkeit von dem Zustand des zu behandelnden Brunnens zwischen 100 und 500 bar an der Erzeugereinheit eingestellt werden. Die eingesetzte Wassermenge liegt zwischen 1,5 ... 3 l/s (5,4 ... 9,0 m<sup>3</sup>/h).

Der Austrag der abgetrennten Ablagerungen erfolgt mit einer separaten Förderpumpe, die oberhalb des Reinigungsgerätes im Brunnen installiert wird und mindestens die doppelte Menge der eingesetzten Spülwassermenge abfördert.

Zur Erfassung der erzeugten Schwingungen wurde dieses Gerät mit unterschiedlichen Druckstufen zwischen 200 und 400 bar in der Versuchsanlage 1 getestet.

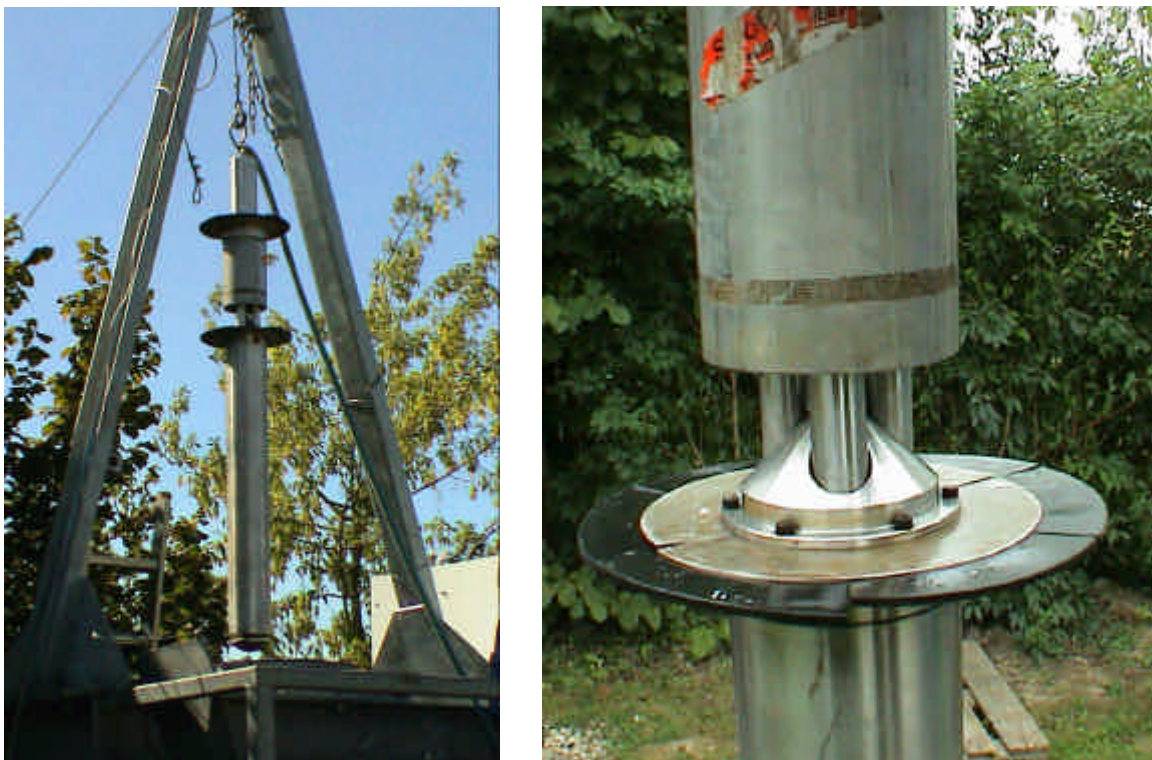


**Abb. 4-4:** *Doppelrotationsaggregat des JET Master von E+M*  
a) *Detailaufnahme der Düsen*  
b) *Demonstration der Wassernebelbildung (außerhalb des Brunnens)*

#### 4.3.4 Pulsator

Der Pulsator, der als Druckwellengenerator eines Druckwellen-/Impulsverfahrens Knallgasexplosionen nutzt, wurde durch die Firma PST Spezialtiefbau GmbH an den Versuchsanlagen getestet (s. **Abbildung 4-5**). Bei diesem Verfahren wird über Elektrolyse Wassers in Knallgas ( $H_2 - O_2$ ) zerlegt und in einer Gasglocke gesammelt. Nach der Erzeugung einer entsprechenden Menge Knallgas wird dieses Gemisch durch Zündung zur Reaktion gebracht. Der dabei auftretende Zerfall des Knallgases führt zu einer Implosion. Die durch diese Effekte erzeugten Druckwellen wurden in der Versuchsanlage 1 gemessen. Die bei den Versuchen genutzte Elektrolysezeit lag bei ca. 20 s.

Über die Länge der Elektrolysezeit, die etwa zwischen 20 – 60 s variiert werden kann, ist eine Beeinflussung der Knallgasmenge und somit der Stärke der Implosionen möglich.



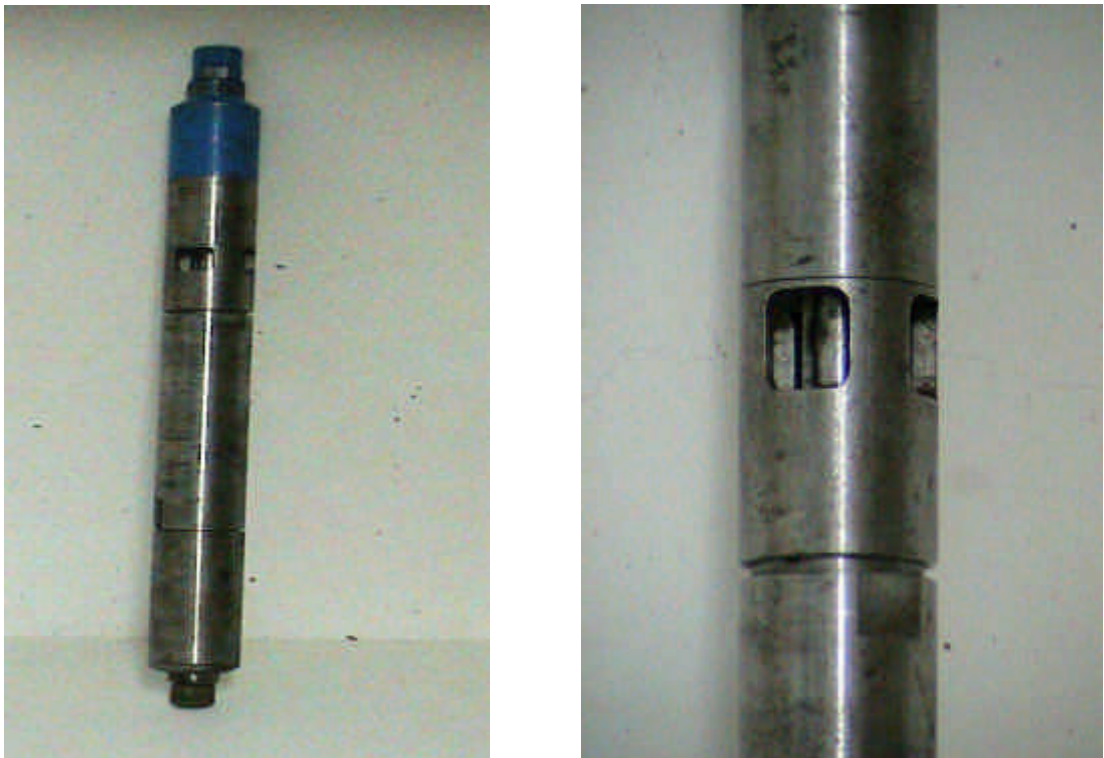
**Abb. 4-5:** Pulsator der Fa. PST  
a) beim Einbau in die Versuchsanlage 1  
b) Detailaufnahme der Druckwellenauslasszone



### 4.3.5 Impulsgeneratoren

Als erster Vertreter des mit Gaskomprimierung arbeitenden Druckwellen-Impulsverfahrens, wurde der Impulsgenerator der pigadi GmbH Berlin getestet. Das Funktionsprinzip des getesteten Gerätes besteht darin, dass durch eine schlagartige Expansion eines hochkomprimierten Gases (in diesem Falle inerter Stickstoff) Impulse erzeugt werden. Der Impulsgenerator ist mit einem besonderen Ventilsystem ausgestattet, welches in sehr kurzen Schaltzeiten (Millisekunden) durch Öffnen großer Querschnitte die im Generator akkumulierte Energie (hochgespanntes Gas) freisetzt. Die Druckkammer besitzt bei diesem Gerät eine Größe von 200 ... 300 ml, der hier aufgebaute Druck ist in einem Größenbereich von 10 bis 130 bar einstellbar. Bei den Tests werden Drücke von 40 ... 60 bar genutzt.

Die Einzelimpulse werden mit einer Frequenz von ca. 1 bis 3 Pulsen je Sekunde erzeugt und direkt in den Brunnen hinein entlassen. Die **Abbildung 4-6** veranschaulicht ein solches Gerät.



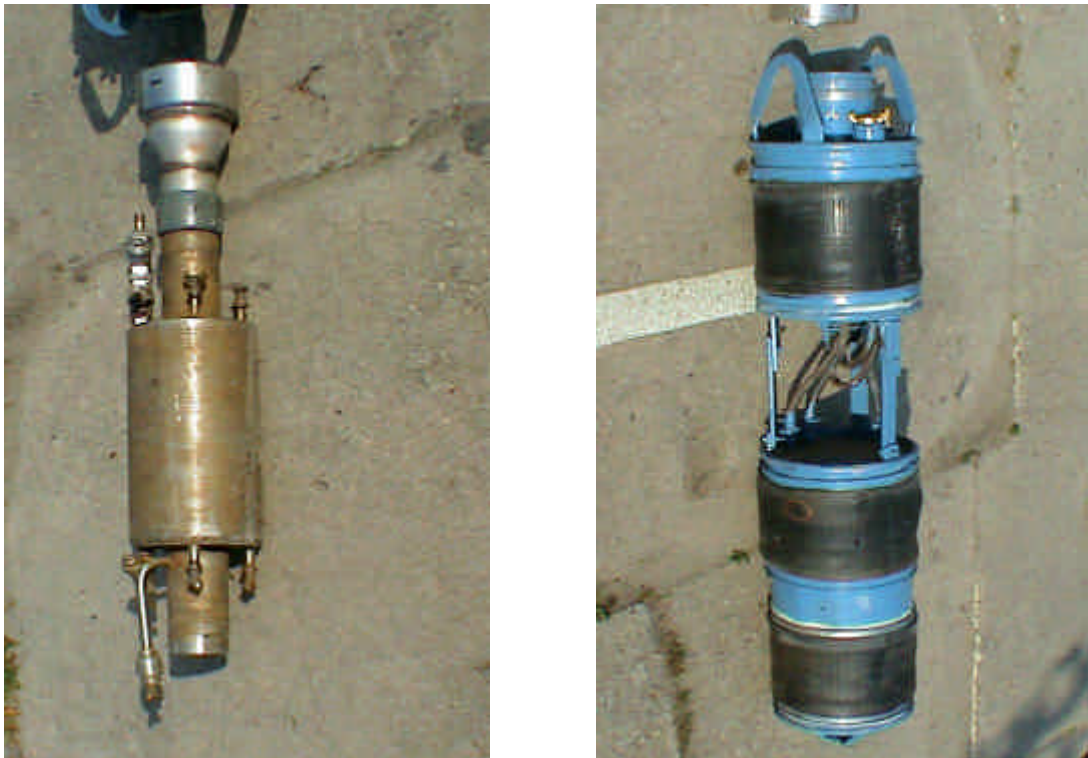
**Abb. 4-6:** Realaufnahme eines Impulsgenerators der Fa. pigadi GmbH

Als zweites Druckwellen-Impulsverfahren bei dem die Druckwellen über die Entspannung einer Druckluftkammer erzeugt werden, wurde das **WellReg-Puls-Verfahren** der Firma AQUAPLUS Brunnensanierung H. Mundig GmbH & Co. KG Kronach am Versuchsstand 1 getestet.

Auch dieses Verfahren baut zunächst in einer Druckkammer einen Druck von bis zu 100 bar auf, um diesen dann impulsartig in einen so genannten Regenerierzylinder abzulassen, wodurch eine Druckwelle erzeugt wird.

Unmittelbar nach dem Puls erfolgt über den Regenerierzylinder der Austrag der gelösten Ablagerungen aus dem Brunnen. Dieses Gerät ermöglicht somit die unmittelbare Aufeinanderfolge von Trennung und Austrag.

Im Versuchsstand 1 wurde dieses Gerät mit Drücken von 10 bar und 20 bar getestet. Die **Abbildung 4-7** veranschaulicht ein solches Gerät.

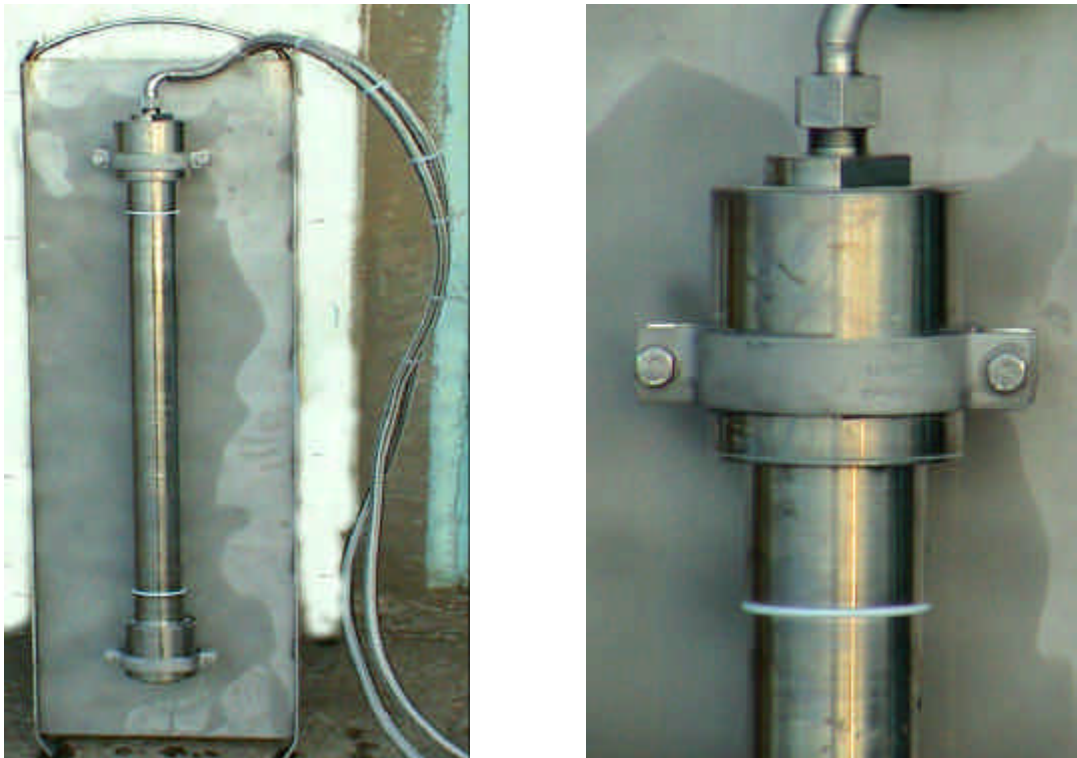


**Abb. 4-7:** Realaufnahme eines WellReg-Puls-Gerätes von AQUAPLUS

#### 4.3.6 Ultraschallsonden

Als erster Vertreter der Ultraschallregenerierung wurde die Erdmann-Sonde der Firma Vormann GmbH & Co. KG Nottuln für Untersuchungen an den Versuchsanlagen genutzt. Die zur Verfügung gestellte Sonde besteht aus zwei Schwingstäben der Länge 1,0 m, die jeweils an beiden Enden mit einem Ultraschallschwinger bestückt sind. Die Sonde besitzt eine Anschlussleistung von 2 x 1,5 kW. Die fest eingestellte Ultraschallfrequenz beträgt 25 kHz. Diese Sonde generiert eine pulsierende Ultraschallschwingung.

Die Aufzeichnung der Schwingungen erfolgte mit unterschiedlichen Messfrequenzen. Damit wurde neben der eigentlichen Ultraschallschwingung auch der pulsierende Charakter ihrer Erzeugung erfasst. Die **Abbildung 4-8** veranschaulicht das getestete Gerät.

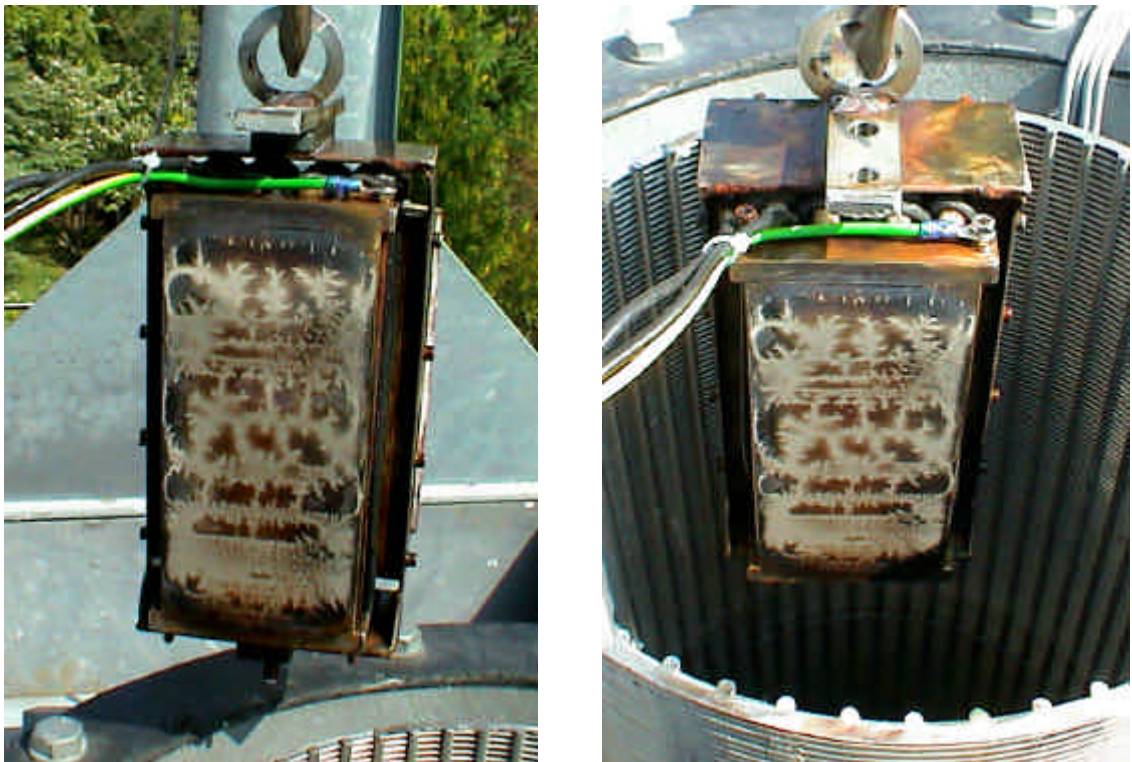


**Abb. 4-8:** Realaufnahme einer Erdmann-Sonde, wie sie von der Firma Vormann eingesetzt wird

Als weiteres Gerät aus der Gruppe der Ultraschallschwinger kam der Schallgeber der Firma Sonic Umwelttechnik GmbH Bad Mergentheim zum Einsatz. Dieser Schallgeber besitzt zwei schallabstrahlende Flächen mit je ca. 160 cm<sup>2</sup> Oberfläche. Die Anschlussleistung beträgt ca. 2,0 kW. Die Schallfrequenz dieser Geber ist 20 kHz.

Für die Regenerierung eines Brunnens werden 6 dieser Schallgeber zu einer Sonde kombiniert. Damit wird ein größerer vertikaler Bearbeitungsbereich als bei Einsatz eines einzelnen Schallgebers erreicht.

Auch für diesen Schallgeber wurde in der Versuchsanlage 1 die Aufzeichnung der initiierten Schwingungen realisiert. Die **Abbildung 4-9** veranschaulicht einen einzelnen Geber einer Sonde.



**Abb. 4-9:** Realaufnahme einer Sonic-Sonde

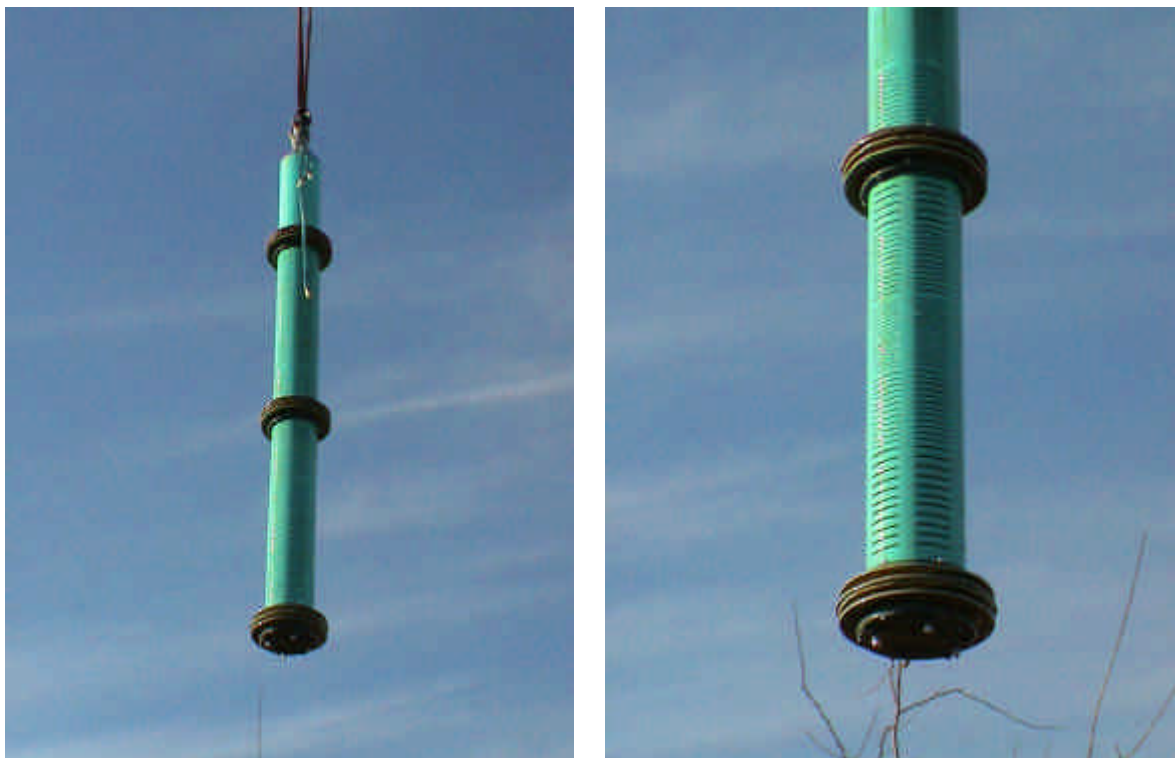
#### 4.3.7 Mehrkammergerät

Obgleich Mehrkammergeräte auch gemäß Einstufung im Merkblatt „W 130“ keine mechanischen Regeneriergeräte darstellen, wurde eines dieser Geräte, die alle trotz unterschiedlicher Konfiguration und Wirkungsweise mit dem Sammelbegriff „Kieswäscher“ bezeichnet werden, in der Versuchsanlage 2 getestet, wohl wissend, dass die Bandbreite des Energieeintrages bezüglich Volumenstrom und Druckhöhe insbesondere in dieser Gerätegruppe eine erhebliche Spannweite besitzt. Zur Bewertung der Ergebnisse der für dieses F+E-Vorhaben getesteten Geräte konnten mit diesem Test jedoch zusätzliche Informationen gesammelt werden.

Zum Einsatz kam der A.B.S. **Kieswäscher** der Firma Aqua Brunnen Service Regenerierungstechnik GmbH München.

Der Einsatz dieses Gerätes erfolgte in der Versuchsanlage 2 unter der Zielstellung der Erfassung der Strömungs- und Potenzialverhältnisse beim Betrieb dieser Technik. Mit diesem Test sollte lediglich der hydromechanische Effekt, der die Grundlage des Transport- und Austrageffektes darstellt, veranschaulicht werden.

Die **Abbildung 4-10** veranschaulicht das getestete Gerät.



**Abb. 4-10:** Realaufnahme des Kieswäschers von A.B.S. der Firma ABS

#### 4.4 Haupttestphasen

Bei der Planung der Tests musste beachtet werden, dass die Vorbereitungsarbeiten eines Tests mindestens eine Woche Arbeitszeit in Anspruch nimmt.

##### **Testphase 1 –** Nachweis der Verdichtung in VA 1 und Erfassung der Potenzialfelder in VA 2

<b>Kalenderwoche</b>	<b>Gerätetechnik</b>	<b>Firma</b>
48. KW 2000	Doppelrotationsaggregat DWI-WHD	E+M
7. KW 2001	Doppelrotationsaggregat DWI-WHD Spülkopf DNWS	E+M DGC / BBW
20 KW 2001	Doppelrotationsaggregat DWI-WHD	E+M
22. KW2001	Spülkopf DNWS	DGC / BBW
25. KW 2001	Doppelrotationsaggregat DWI-WHD	E+M
31. KW2001	Spülkopf DNWS	AQUAPLUS

##### **Testphase 2 –** Nachweis der Schwingungsparameter in VA 1 und Erfassung der Potenzialfelder in VA 2

<b>Kalenderwoche</b>	<b>Gerätetechnik</b>	<b>Firma</b>
35. KW 2001	Einsatz DWI-Knallgas	PST
40. KW 2001	Einsatz DWI-Knallgas	PST
44 KW 2001	Einsatz Ultraschall	Vormann
46. KW2001	Einsatz DWI-Lufthochdruck	pigadi
3. KW 2002	Einsatz Hochdruckinnenspülung	ABS
18. KW2002	Einsatz Ultraschall	Sonic
21. KW 2002	Einsatz Hochdruckinnenspülung Einsatz DWI-Lufthochdruck	AQUAPLUS AQUAPLUS

## 5 Testergebnisse

### 5.1 Ergebnisse der Testserie 1

#### 5.1.1 Ausgangswerte

In der Versuchsanlage VA 1 wurde der geschüttete Filterkies nach einer anlagenspezifischen Vorschrift mit einer Scheibe durch mehrfaches Auf- und Abwärtsfahren verdichtet. Mit dieser „Kolbentechnik“ sollte erreicht werden, dass in der VA 1 etwa eine solche Lagerungsdichte erreicht wird, wie sie auch beim realen Brunnenbau erzielt werden kann.

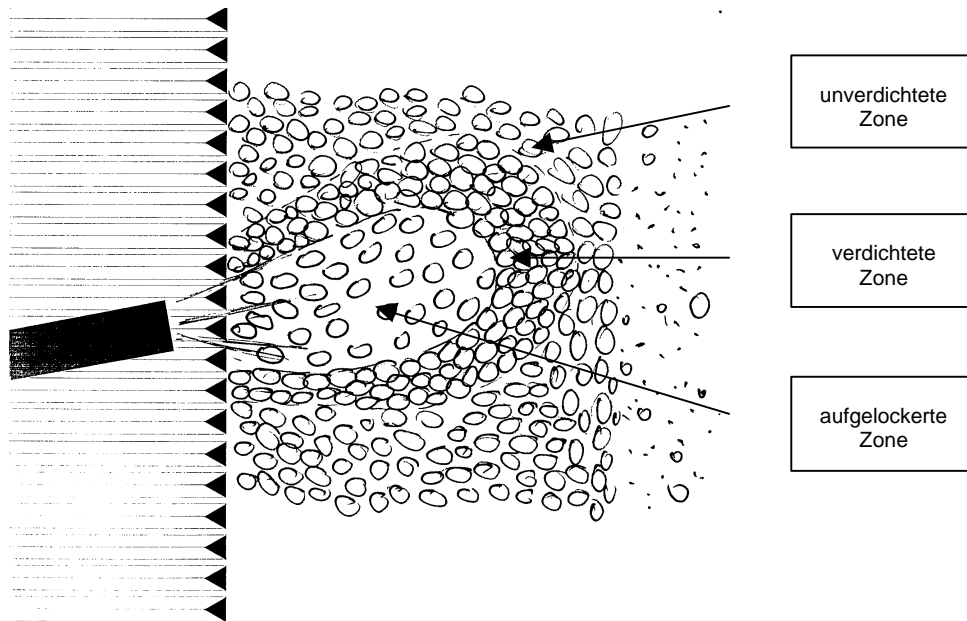
Bezogen auf das eingesetzte Volumen des Kieses erreichte diese Technologie etwa mittlere Lagerungsdichte.

#### 5.1.2 Spülkopf

Der Vergleich der Lagerungsdichte, repräsentiert durch die elektrischen Widerstände vor und nach dem Einsatz der Gerätetechnik der Niederdruck-Innenspülung zeigt, dass im Bereich des Filterkieses die spezifischen Widerstände um ca. 4 bis 10 % angestiegen waren und damit eine Porositätsabnahme anzeigten, während in der anstehenden Bodenformation sich die Lagerungsdichte und damit die Porosität nicht geändert hatte.

Dass der Waschprozess solche Effekte auslöst, war von vornherein zu erwarten. Die lokale Beschränkung der Verdichtung auf die Zone der Filterkiesschüttung stellte eine neue Erkenntnis dar.

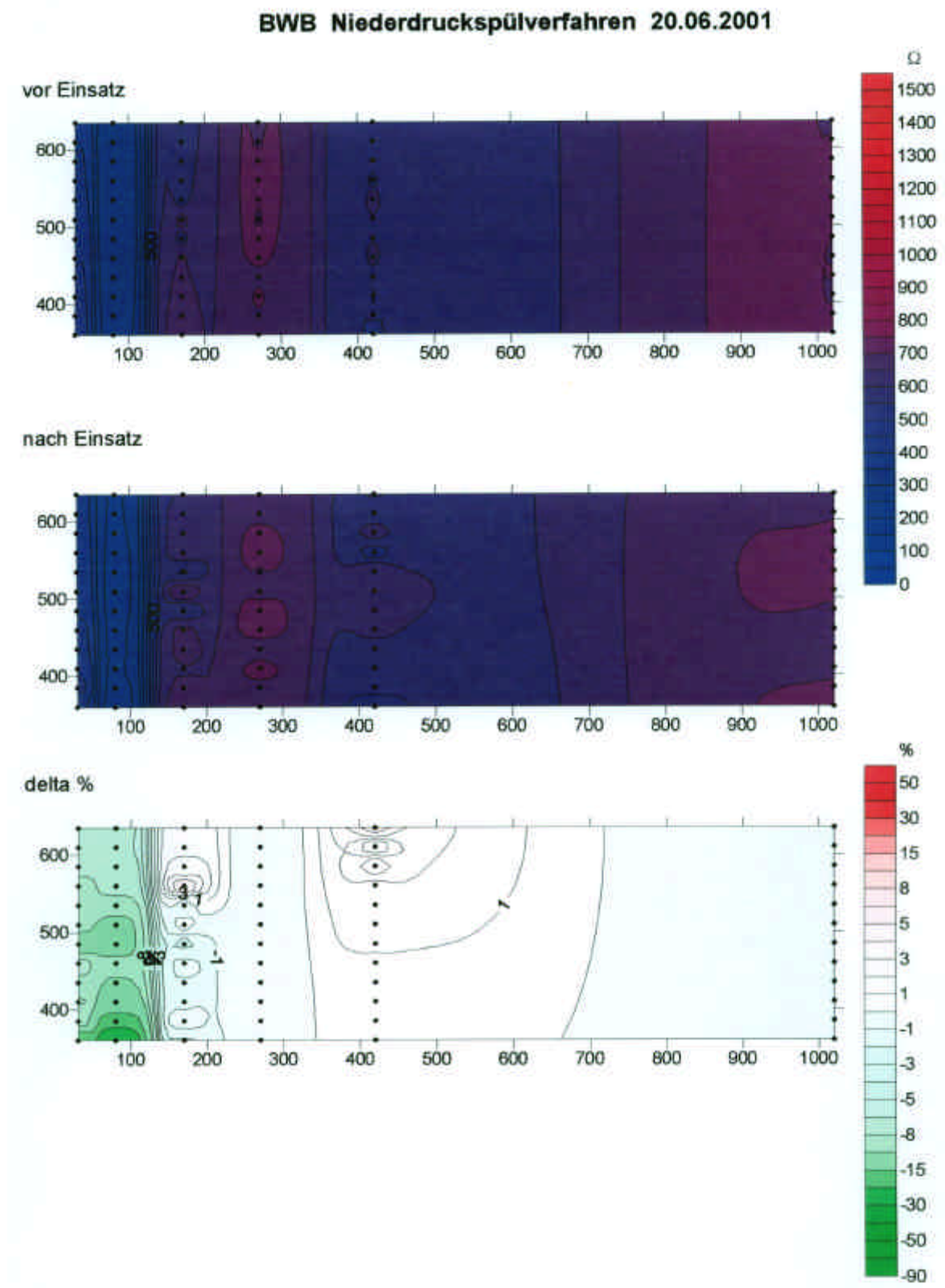
Die Hypothese, dass die massiven Waschstrahlen des Spülkopfes im zentralen Aktionsfeld eine aufgelockerte Zone schaffen, die es gestatten, dass die Kieskörner wie in einer Kugelmühle gewaschen werden, indem die einzelnen Körner gedreht werden und sich dabei reiben, konnte über ein Endoskop beobachtet und damit bestätigt werden. Den Raum für diese Waschzone schaffen sich die Waschstrahlen durch eine Verdichtung der Randzonen des Aktionsraumes. Auf diese Weise ist es auch erklärbar, weshalb die Wirkung des Spülkopfes auf die Kieszone beschränkt bleibt. Die **Abbildung 5-1** soll diese Effekte schematisch veranschaulichen. Die Erhöhung der Lagerungsdichte (Abnahme der Porosität) blieb in jedem Fall unter 10 % des Ausgangswertes.



**Abb. 5-1:** Darstellung der beobachteten Wirkung des Spülstrahles eines Spülkopfes auf das Material der Kiesschüttungszone

Durch die Wanderung des Spülkopfes in vertikaler Richtung werden diese Zonen, so wie sie aufgebaut werden, wieder abgebaut. Eine bleibende Verdichtung der Filterkieszone, so wie das die Widerstandsmessung offenbarte, ist damit als Effekt des Spülkopfeinsatzes vorstellbar. In **Abbildung 5-2** sind die Ergebnisse der Dichtemessung grafisch dargestellt.





**Abb. 5-2:** Darstellung der Verdichtung der Filterkiesschüttung infolge des Einsatzes eines Spülkopfes

Unter realen Bedingungen, unter denen die Spülung intensiver erfolgt, wird dieser Effekt der Erhöhung der Lagerungsdichte der Filterkieskörnung größer sein, als er in der VA 1 gemessen wurde. Trotzdem erscheint eine Ausbreitung der Verdichtungseffekte in die anstehende Bodenformation bei den oben beobachteten Effekten eher als unwahrscheinlich.

Bei der Spülung des Filterkieses mit dem Spülkopf wurde registriert, dass der massive Wasserstrom den Austrag von Unterkorn in starkem Maße übernimmt. Diese Aussage soll vorerst als qualitative Feststellung gelten.

### 5.1.3 Spülaggregate

Bei den Spülaggregaten, die mit Wasserhochdruck arbeiten, wurde, wie bei dem Spülkopf der Niederdruckwasserspülung, ein geringer Anstieg der Lagerungsdichte gemessen, obgleich hierbei keine solch intensiven Waschprozesse beobachtet werden konnten. Auffallend war aber, dass die Verdichtungseffekte auch noch unmittelbar hinter der Kontaktzone Kies/anstehende Bodenformation gemessen wurden.

Da der Verdichtungseffekt der Spülaggregate mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf Waschprozesse zurückgeführt werden konnte, lag die Hypothese nahe, dass auch die Spülaggregate, die mit Wasserhochdruck arbeiten, Schwingungen auslösen, die letztlich für eine Lagerungsverdichtung verantwortlich zeichnen.

Die Hypothese für die Verdichtungseffekte sollte bei der Testserie 2 mit der Messung der erzeugbaren Schwingungen geklärt werden.

### 5.1.4 Doppelrotationsaggregat

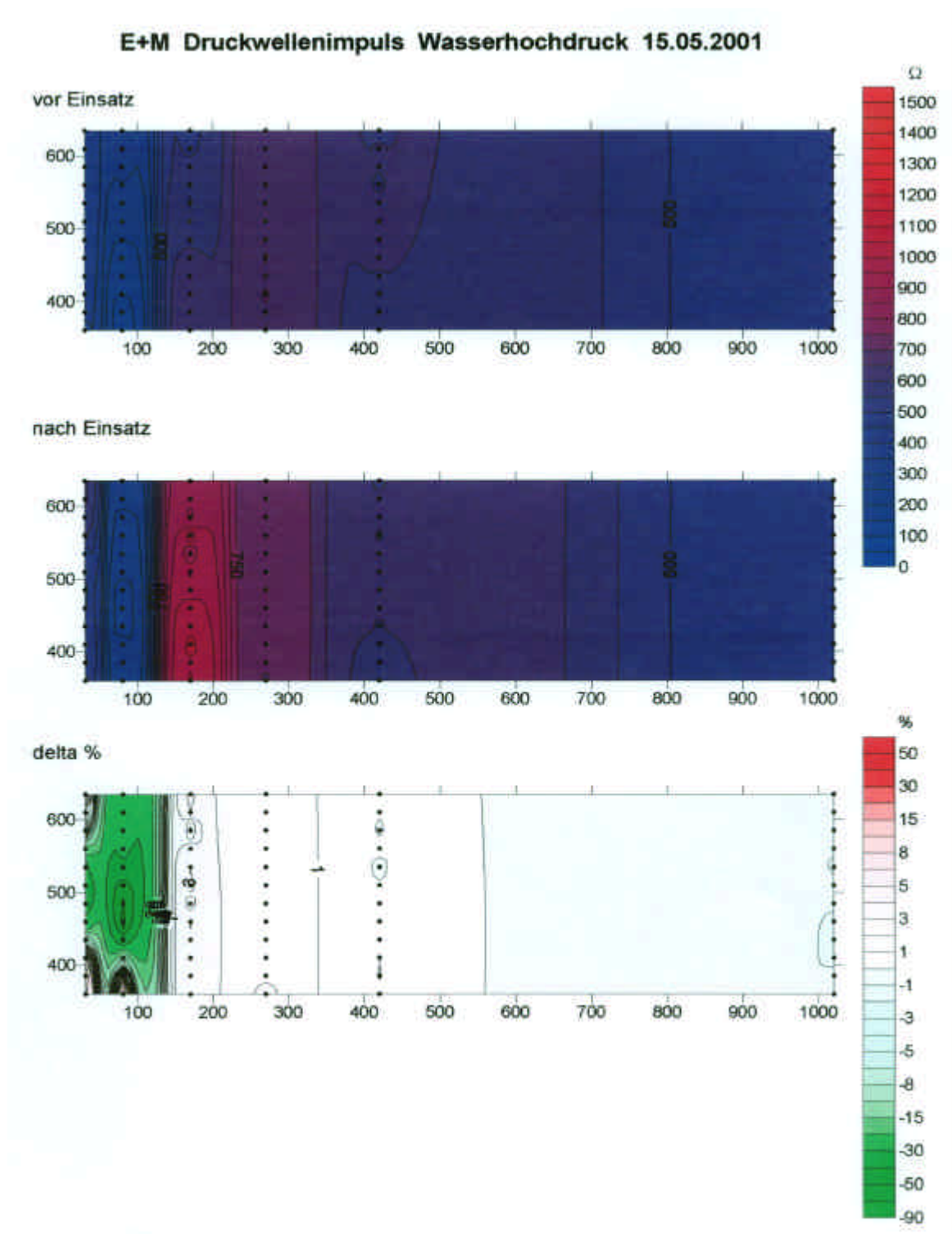
Das Doppelrotationsaggregat erzeugte in der Versuchsanlage VA 1 in der Filterkiesschüttung eine messbare Erhöhung der Lagerungsdichte. Die **Abbildung 5-3** veranschaulicht die Messergebnisse grafisch.

Dieser Effekt war vom Grundsatz her zu erwarten, da im Erdbau mit diesem Prinzip (z. B. Rütteldruckverdichtung, Vibrationsplatten, Vibrationswalze) seit langem gearbeitet wird.

Der Verdichtungseffekt in der VA 1 wurde registriert, obgleich beim Einsatz des Doppelrotationsaggregates ein bemerkenswerter Feinkornaustrag auftrat (Entsandungseffekt).

Unerwartet und nicht erklärbar war, dass die verdichtende Wirkung der Druckwellen des Doppelrotationsaggregates an der Schichtgrenze Filterkies/anstehende Bodenformation auf nahezu Null abfällt.

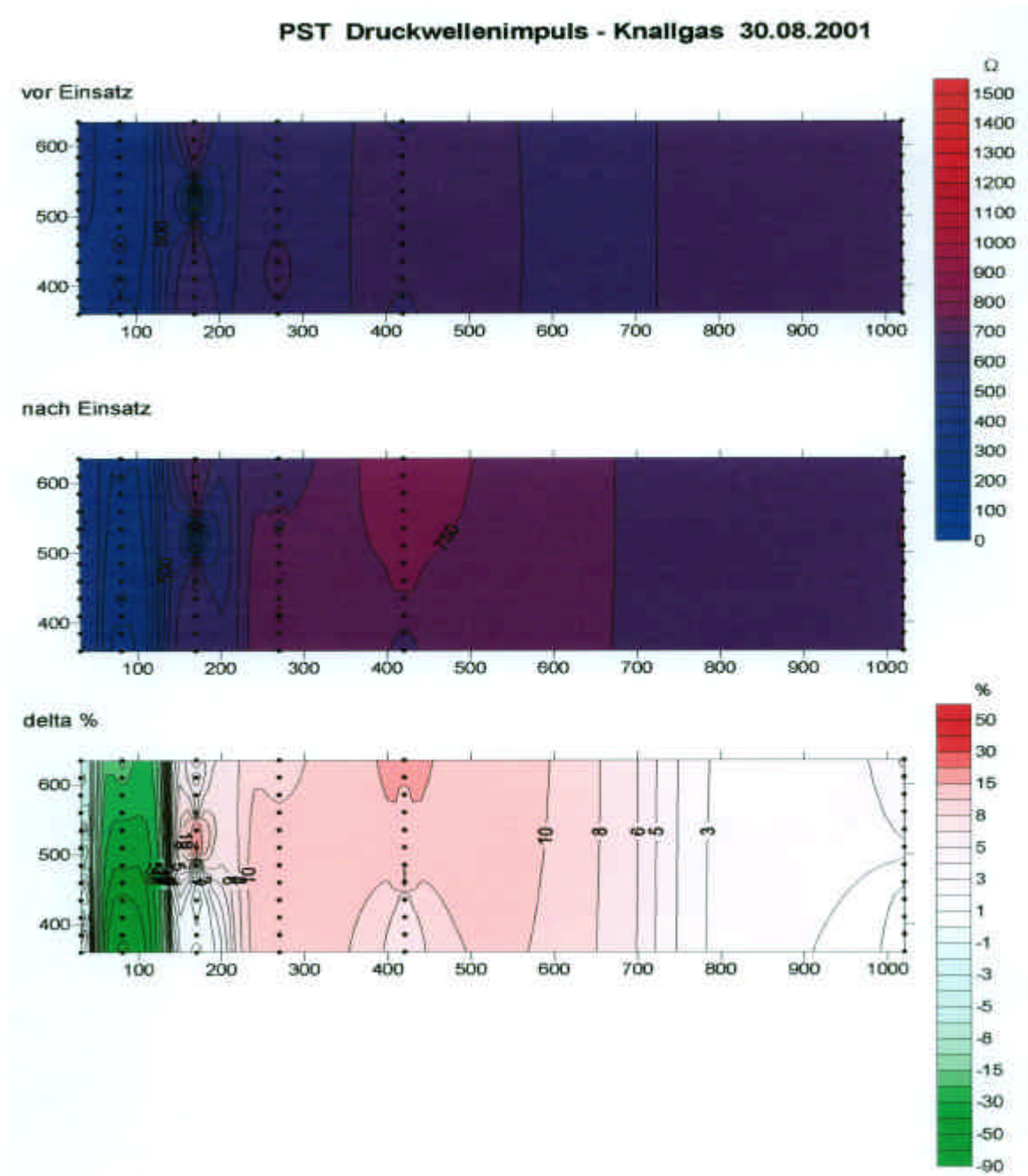
Die Messergebnisse ließen zunächst vermuten, dass sich die durch das Doppelrotationsaggregat ausgelösten Vibrationseffekte und damit der Wirkungsbereich im Wesentlichen auf die Filterkiesschicht beschränken.



**Abb. 5-3:** Darstellung der Verdichtungseffekte nach dem Einsatz des Doppelrotationsaggregates

### 5.1.5 Pulsator

So, wie beim Doppelrotationsaggregat, zeigten auch die Widerstandsmessungen beim Pulsator-Test, dass im Bereich der Filterkiesschüttung eine messbare Verdichtung erreicht wird und dieser Effekt an der Kontaktzone Filterkies/anstehende Bodenformation aufgehoben wird. Die **Abbildung 5-4** veranschaulicht diese Effekte.



**Abb. 5-4:** Darstellung der Verdichtungseffekte nach Einsatz des Pulsators

### **5.1.6 Zwischenbewertung des Messverfahrens**

Stellt man die mit der geo-elektrischen Widerstandsmessung gewonnenen Messwerte, die die Veränderungen der Porosität repräsentieren sollten, für die einzelnen zu bewertenden Geräte gegenüber, so muss man erkennen, dass mit der eingesetzten Messtechnik unter den gegebenen Randbedingungen der Versuchsanlage ein Nachweis der Wirkungstiefe (hier in Form der Strukturveränderung) nicht mit der Genauigkeit geführt werden konnte, wie dies für eine Bewertung der Technik notwendig gewesen wäre.

Wenn im Ergebnisbericht dennoch einige Werte aus dem Testprogramm dokumentiert werden, so erfolgte dies unter dem Aspekt, dass die genannten Tendenzen und Effekte der Strukturveränderungen geholfen haben, die Schwingungsmessungen und die Strömungsnachweise letztlich besser interpretieren zu können.

Es sollte heute als nachgewiesen gelten, dass der Einsatz der Spültechnik und der Einsatz der Technik der Druckwellenverfahren eine Erhöhung der Lagerungsdichte der geschütteten Filterkieszone nach sich ziehen. Diese Setzungseffekte werden beim Ersteinsatz an einem Brunnen groß sein und beim wiederholten Einsatz abklingen.

Der Effekt, dass sich die gesamte Kiesschüttung beim Einsatz der Regeneriertechnik setzt, das anstehende Bodenmaterial hingegen selbst unweit der Kiesschüttung in seiner Lagerungsdichte verbleibt, veranschaulicht noch einmal, dass die Kontaktzone 2, die die Bohrlochwand dargestellt hat, auch nach dem Brunnenausbau Relevanz behält.

## 5.2 Ergebnisse der Testserie 2 (Schwingungsmessungen und Strömungsmessungen)

### 5.2.1 Ausgangswerte

Die Erfassung der Druckwellencharakteristik und die Dämpfung der Druckwellen im Filterkies bzw. in der anstehenden Bodenformation in der VA 1 und die Erfassung der Strömungsfelder in der VA 2 sollte im Wesentlichen als maßgebender Nachweis für die Eindringtiefe der Regeneriergeräte genutzt werden.

Die VA 1 wurde für jeden Test so vorbereitet, wie dies im Abschnitt 5.11 beschrieben ist.

Die VA 2 war nach den Vortests so verdichtet, dass Einflüsse aus der Strukturveränderung (Verdichtung) ausgeschlossen werden konnten (Zumindest wurde im Weiteren keine Volumenreduzierung mehr gemessen, so dass die Annahme gerechtfertigt war.).

### 5.2.2 Spülkopf

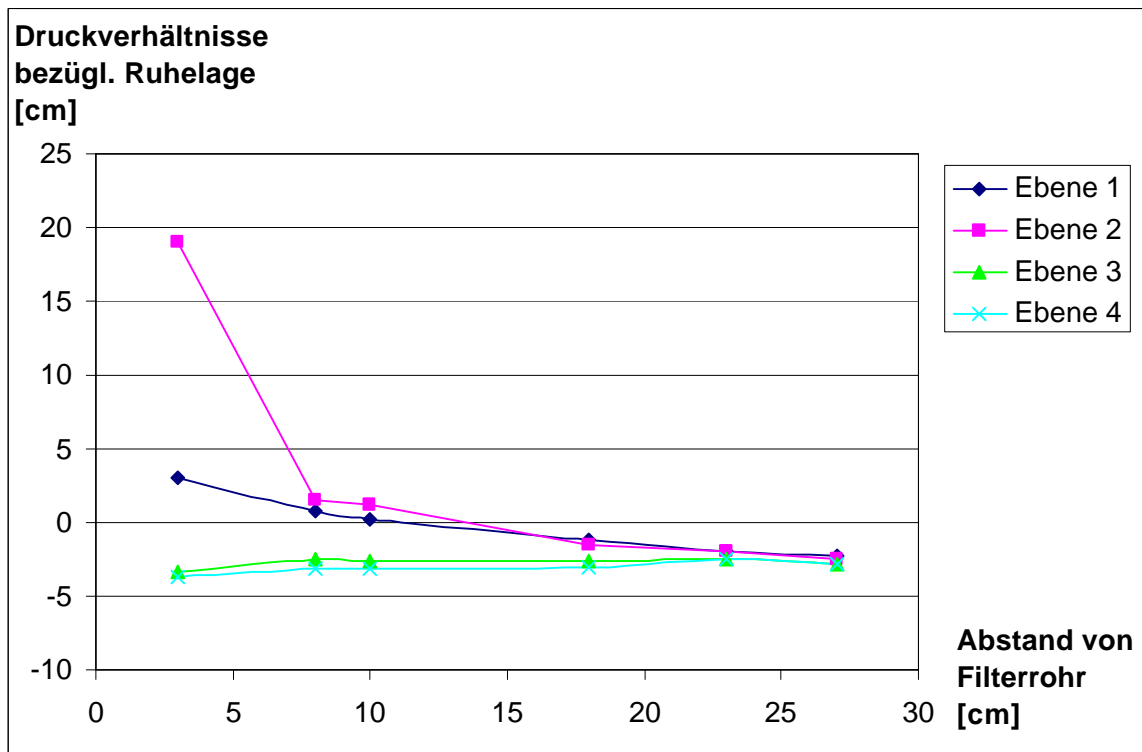
Die Umwälzung großer Wassermengen auf geringer vertikaler Ausdehnung führt bei der Niederdruckwasserspülung zur Ausbildung erheblicher Potenzialunterschiede des anstehenden Grundwassers im Filterkiesbereich und damit zu einer starken Wasserströmung in dem Bereich, der das Filterrohr umschließt.

Durch die nahezu horizontale Abgabe des Spülwassers im Bereich des Düsenkranzes und die Aufnahme des Spülwassers im Bereich des Pumpeneinlaufes entsteht ein vertikal eng abgegrenztes Strömungsfeld. Die durch die nur wenig unterhalb der Wasserabgabe angeordnete Wasserentnahme erzwungene, scharfe Strömungsumlenkung führt zu starken Potenzialunterschieden im filternahen Bereich in Höhe des Spülkopfes. **Tabelle 5-1** veranschaulicht die aufgezeichneten Daten der Potenzialmessung bei der Testung des Spülkopfes NDSK 300.

**Tab.: 5-1:** Messdaten Potenzialverhältnisse Niederdruckwasserspülung in der VA 2 (Darstellung der  $D_p$ -Werte) für die Kombination NDSK 300/Niederdruckwasserspülung

vertikale Ebene der Potenzialaufnehmer	Höhe bezügl. Spülkopfdüsen	links		rechts		links		rechts		horizontale Anordnung der Potenzialaufnehmer
		3	2	2	3	1	1	Abstand von Filterrohr		
1	10,5	3	0,8	0,2	-1,2	-2	-2,3	Spülkopfposition		
2	-2	19	1,5	1,2	-1,5	-2	-2,5			
3	-14,5	-3,4	-2,5	-2,6	-2,6	-2,5	-2,8			
4	-27	-3,7	-3,1	-3,2	-3	-2,5	-2,8			
5	-39,5	-3,7	-3,2	-3,3	-2,8	-3	-3			
6	-52	-3,6	-3,5	-3,5	-2,8	-2,8	-3			
7	-64,5	-3,6	-3,2	-3,7	-3,2	-2,6	-3			
8	-77	-3,5	-3,1	-3,5	-3,2	-2,7	-2,8	Entnahmeposition		
9	-89,5	-3,8	-3,2	-3,5	-3,3	-2,6	-3			
10	-102	-3,8	-3,2	-3,5	-3	-2,6	-3			
11	-114,5	-3,5	-3,4	-3	-3,5	-2,7	-4,3			

Die grafische Darstellung der Druckentwicklung veranschaulicht in der **Abbildung 5-5** in aller Deutlichkeit, dass bei diesem Modelltest in nur 4 Messebenen die Ausbildung des Strömungsbereiches erfolgte.

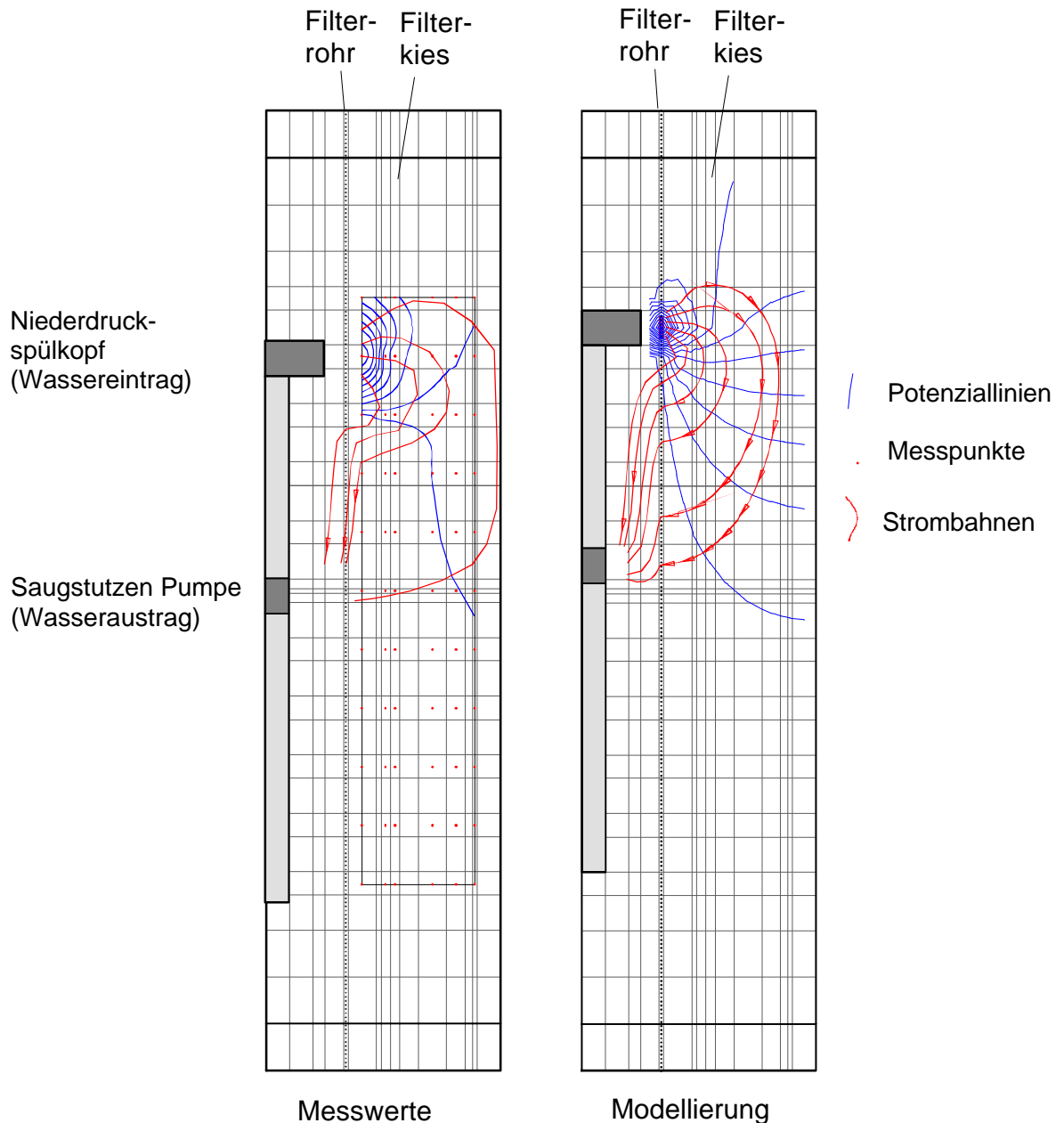


**Abb. 5-5:** Potenzialverhältnisse Niederdruckwasserspülung

In der Versuchsanlage erfolgte der wesentliche Anteil der Strömung zwischen den Ebenen 2 und 3, also innerhalb eines vertikalen Bereiches von nur 0,12 m. In diesem Bereich treten an der ersten vertikalen Messreihe, also in einem Abstand von ca. 0,03 m vom Filterrohr, Potenzialdifferenzen von bis zu 0,25 m auf. Diese hohen Differenzen sind an der zweiten Messreihe bereits auf ca. 0,05 m reduziert.

Zur Verdeutlichung der Strömungsverhältnisse beim Einsatz der Niederdruckwasserspülung erfolgte zum einen die Konstruktion des Strömungsfeldes auf der Basis der Messwerte (s. **Abbildung 5-6a**) und zum zweiten die Modellierung des Strömungsfeldes auf der Basis eines mathematischen Modells (s. **Abbildung 5-6b**). Der Vergleich der beiden Strömungsfelder zeigt, dass das mathematische Modell die Messergebnisse relativ exakt zu simulieren vermag.





**Abb. 5-6:** Strömungsverhältnisse bei Spülkopf NDSK 300

a) auf Basis von Messwerten

b) auf Basis einer mathematischen Modellierung

Die Strömungsbilder zeigen, dass der durchflossene Bereich im Filterkies relativ klein ist und durch die großen eingesetzten Wassermengen relativ intensiv durchströmt wird. Die schnelle Rückführung des Wasserstromes in den Brunnen und die Vertikalpassage des Wassers im Brunnenrohr wirkt bei erster Abschätzung unproduktiv.

Die Behandlungstiefe der Spülköpfe im Sinne einer intensiven Wasserströmung bleibt mit diesem Ergebnis auf den Bereich der Filterkiesschüttung beschränkt. Sie ist in einem Abstand von 25 cm vom Filterrohr so klein, dass damit wohl keine turbulenten Strömungen für einen Waschprozess ausgelöst werden können.

Der Einsatz der Technik in der Versuchsanlage 1 hat gezeigt, dass bei diesem Verfahren keine Schwingungen erzeugt werden, die mit der genutzten Schwingungsmesstechnik erfasst werden können. Es sollte damit als nachgewiesen gelten, dass bei der Niederdruckwasserspülung die Trennung und der Austrag auf rein hydraulischer Basis erfolgen wird.

### 5.2.3 Rotationshochdruck-Geräte

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurden Geräte zur Hochdruckinnenspülung von zwei unterschiedlichen Fabrikaten (HRH und Welljet) getestet. Die Ergebnisse beider Geräte waren sowohl in der Schwingungserzeugung als auch hinsichtlich der Strömungsverhältnisse so ähnlich, dass die Bewertung der Techniken zusammen erfolgen kann.

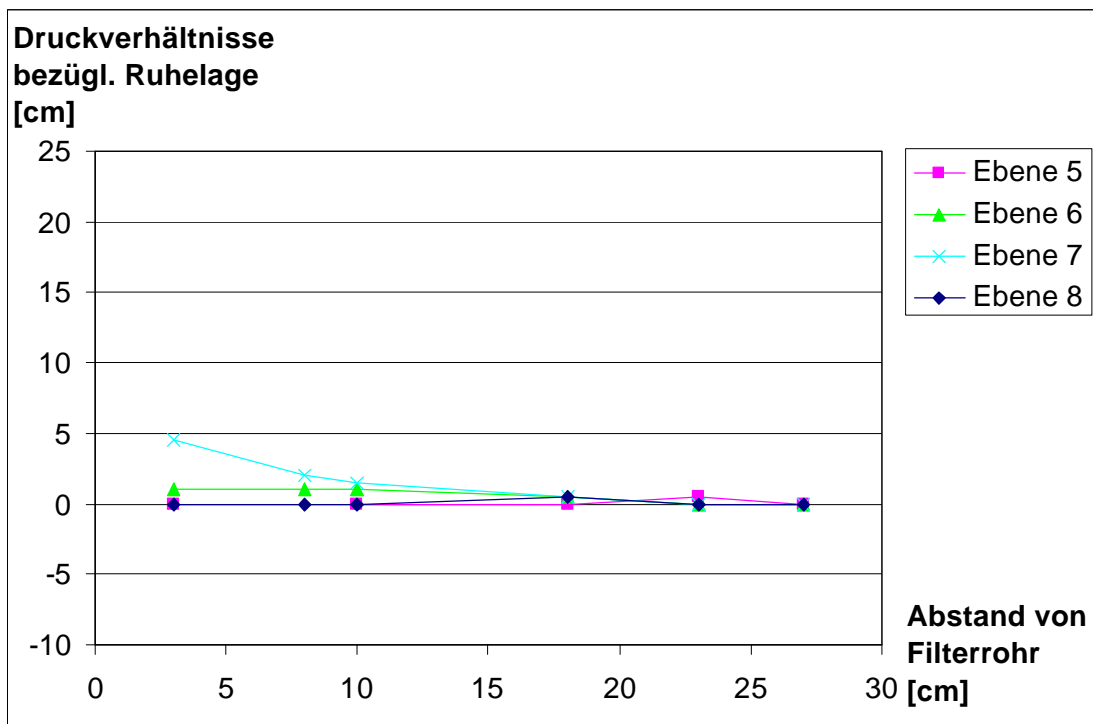
Zur Klärung der durch diese Technik erreichbaren Strömungsprozesse wurden diese Apparate zunächst in der VA 2 getestet.

Bedingt dadurch, dass diese Geräte mit relativ geringer Wassermenge arbeiten, kommt es in der Filterschüttung schnell zu einem sehr starken Potenzialabfall. Bereits an der ersten Messreihe beträgt die maximale Potentialdifferenz zwischen zwei Messebenen nur noch 0,05 m. Die Messdaten für eine typische Messung der Potenzialverhältnisse sind in **Tabelle 5-2** enthalten.

**Tab. 5-2:** Messdaten Potenzialverhältnisse Hochdruckinnenspülung

vertikale Ebene der Potenzialaufnehmer	Höhe bezügl. Spülkopfdüsen	horizontale Anordnung der Potenzialaufnehmer						Abstand von Filterrohr [cm]
		links	links	rechts	rechts	links	rechts	
			3	2	2	3	1	1
			3	8	10	18	23	27
1	75	0	0	0	0	0	0	0
2	62,5	0	0	0	0	0	0	0
3	50	0	0	0	0	0	0	0
4	37,5	0,5	0,5	0	0	-0,5	0	0
5	25	0		0	0	0,5	0	0
6	12,5	1	1	1	0,5	0	0	0
7	0	4,5	2	1,5	0,5	0	0	0
8	-12,5	0	0	0	0,5	0	0	0
9	-25	0	0	0	0	0	0	0
10	-37,5	0	0	0	0	0	0	0
11	-50	0	0	0		0	0	0

Die grafische Darstellung der Potenzialmesswerte veranschaulicht, dass bei diesem Test nur in zwei Messhorizonte, begrenzt durch 3 Messebenen, Strömungsprozesse auftreten (s. **Abbildung 5-7**). Der Einflussbereich der Rotationshochdruckgeräte liegt damit eindeutig vorrangig auf der Filterrohrinnenwand und den Filterschlitzten. Die Wirkung auf die Filterkiesschicht reduziert sich im Wesentlichen auf einen eng begrenzten Horizont in Höhe der rotierenden Düsen.



**Abb. 5-7:** Potenzialverhältnisse Hochdruckinnenspülung

Bei dem Test in der VA 2, insbesondere bei der Arbeit mit niedrigen Drehzahlen, fiel auf, dass die Potenzialwerte pulsierten. Diesen Effekt aufgreifend, wurden die Geräte in der VA 1 zur Erfassung von Schwingungen getestet. **Tabelle 5-3** veranschaulicht diese Messwerte, die in der VA 1 an der Messsonde 1, d. h. im Filterkies gemessen wurden.

**Tab. 5-3:** Schwingungsauswertung Hochdruckinnenspülung Sonde 1

Messwerte

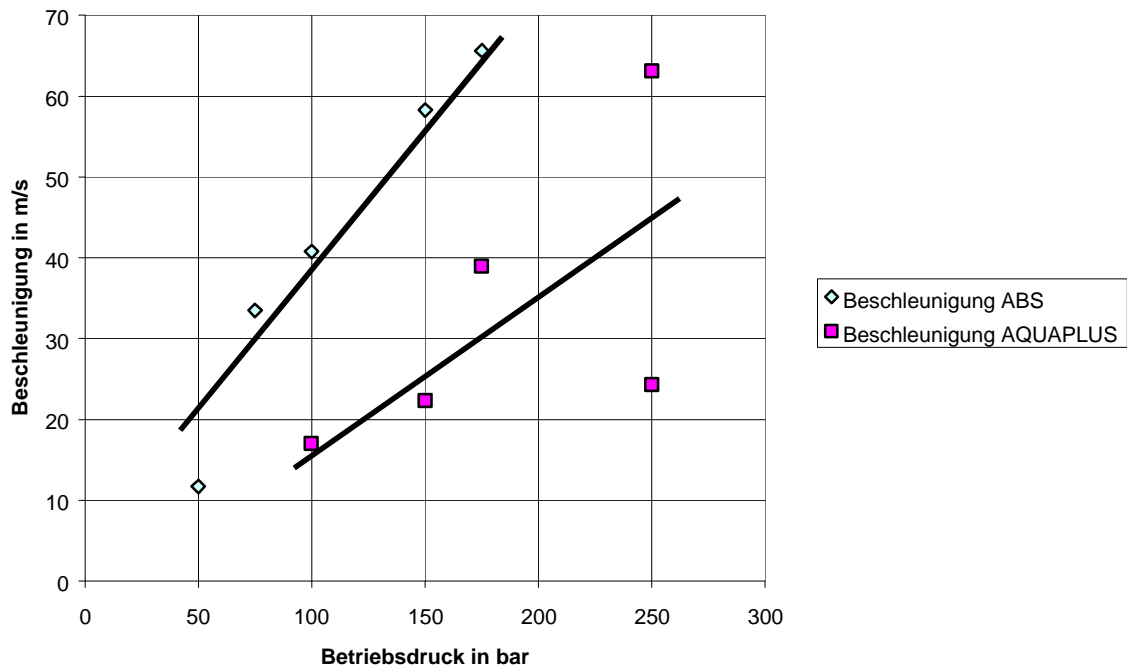
Verfahren	Betrieb	Frequenz f	Max. Beschleunigung a
		[Hz]	[m/s <sup>2</sup> ]
HDS (ABS)	50 bar	660	11,7
	75 bar	500	33,5
	100 bar	500	40,8
	150 bar	500	58,3
	175 bar	500	65,6
(AQUAPLUS)	100 bar	700	17,0
	150 bar	600	22,3
	250 bar (60 Umin)	500	38,9
	250 bar (100 Umin)	500	24,3
	250 bar (30 Umin)	500	63,1

Auffallend ist, dass beide Rotationshochdruckgeräte unabhängig vom Gerätetyp und auch unabhängig vom eingesetzten Druck, Druckwellen mit einer Frequenz

$$f = 500 \dots 700 \text{ Hz}$$

zu erzeugen vermögen.

Dass sich dabei die Größe der Beschleunigung in Abhängigkeit vom Druck ändert, ist erklärbar. Auffallend war dabei wieder, dass sich die Gerätetypen in ihrer Wirkung nur wenig unterscheiden (s. **Abbildung 5-8**).



**Abb. 5-8:** Grafische Darstellung der Beschleunigungs-Messwerte, die mit rotierenden Hochdruckdüsen an der Sonde 1 gemessen wurden

Auf der Basis der relativ wenigen Tests ergab sich der Schwankungsbereich der Beschleunigung mit etwa

$$a = 10 \dots 70 \text{ m/s}^2.$$

Die maximalen Wegamplituden dieser Schwingungen bleiben relativ konstant, da für diesen Parameter die Frequenz, die im Quadrat eingeht, die dominierende Rolle spielt. Der Bereich der maximalen Wegamplitude liegt etwa bei

$$x_{\text{max.}} = 1 \dots 6 \times 10^{-6} \text{ [m]}.$$

Die maximalen Geschwindigkeiten schwanken in einem größeren Bereich, weil hierbei Frequenz und Beschleunigung den gleichen Einfluss haben. Der Bereich der maximalen Geschwindigkeit wurde in den Grenzen

$$v_{\text{max.}} = 0,006 \dots 0,02 \text{ m/s}$$

ermittelt.

Die spezifische Energie, die bei diesem Test an der Sonde 1 ermittelt wurde, schwankt in Abhängigkeit vom Betriebsdruck der Aggregate im Bereich

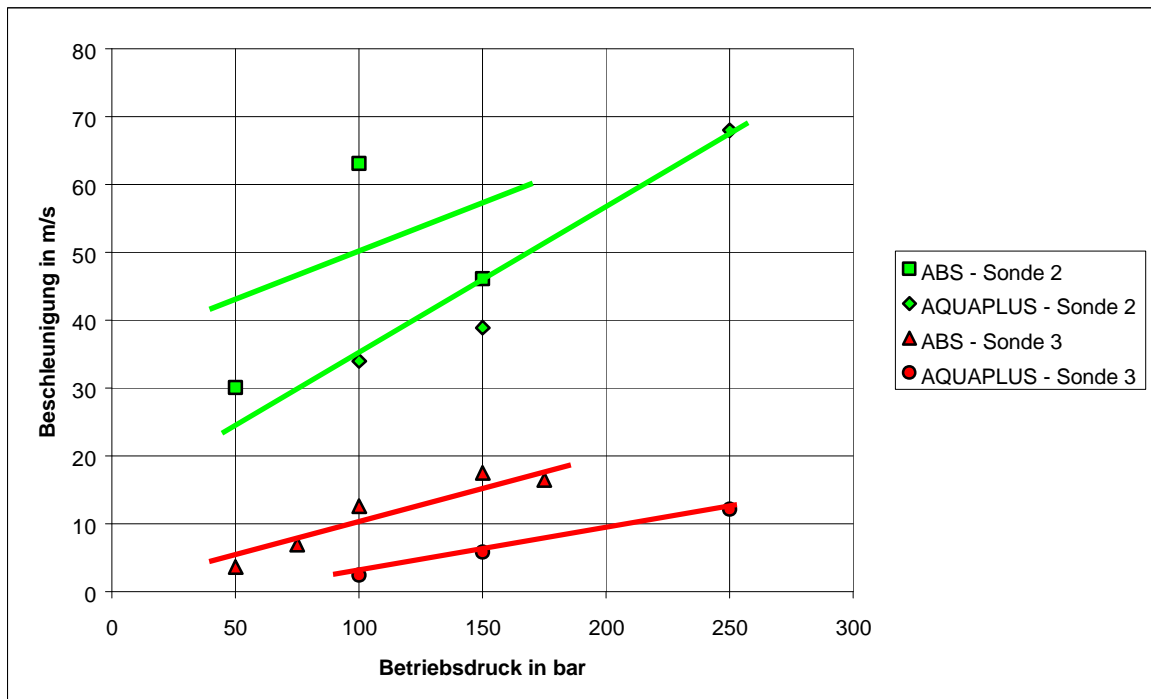
$$E = 4 \times 10^{-6} \text{ bis } 2 \times 10^{-4} \text{ Nm/kg}.$$

Betrachtet man die Messergebnisse der Beschleunigung an der Sonde 2, um daraus die Dämpfung der Druckwelle im Filterkies ableiten zu können, ergibt sich ein Bild, wie es in **Abbildung 5-9** dargestellt ist. Auffallend ist dabei die große

Streuung der Messwerte. Weiterhin ist auffallend, dass die Beschleunigung in der Filterkiesschicht nahezu keine Dämpfung erfährt, sondern die Messwerte im Bereich

$$a = 30 \text{ bis } 70 \text{ m/s}^2$$

quasi konstant bleiben.



**Abb. 5-9:** Grafische Darstellung der Beschleunigungsmesswerte, die mit den rotierenden Hochdruckdüsen an den Sonden 2 und 3 gemessen wurden

Bei den weiteren Parametern ergaben sich folgende Werte:

- Wegamplitude	$x_{\max.} = 0,1 \dots 6 \cdot 10^{-6} \text{ m},$
- Schwingungsgeschwindigkeit	$v_{\max.} = 0,007 \dots 0,02 \text{ m/s},$
- spezifische Energie	$E = 3 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-4} \text{ Nm/kg}.$

Nach der Kontaktzone Filterkies/anstehende Bodenformation wurde an der Sonde 3 die Beschleunigung in dem Bereich

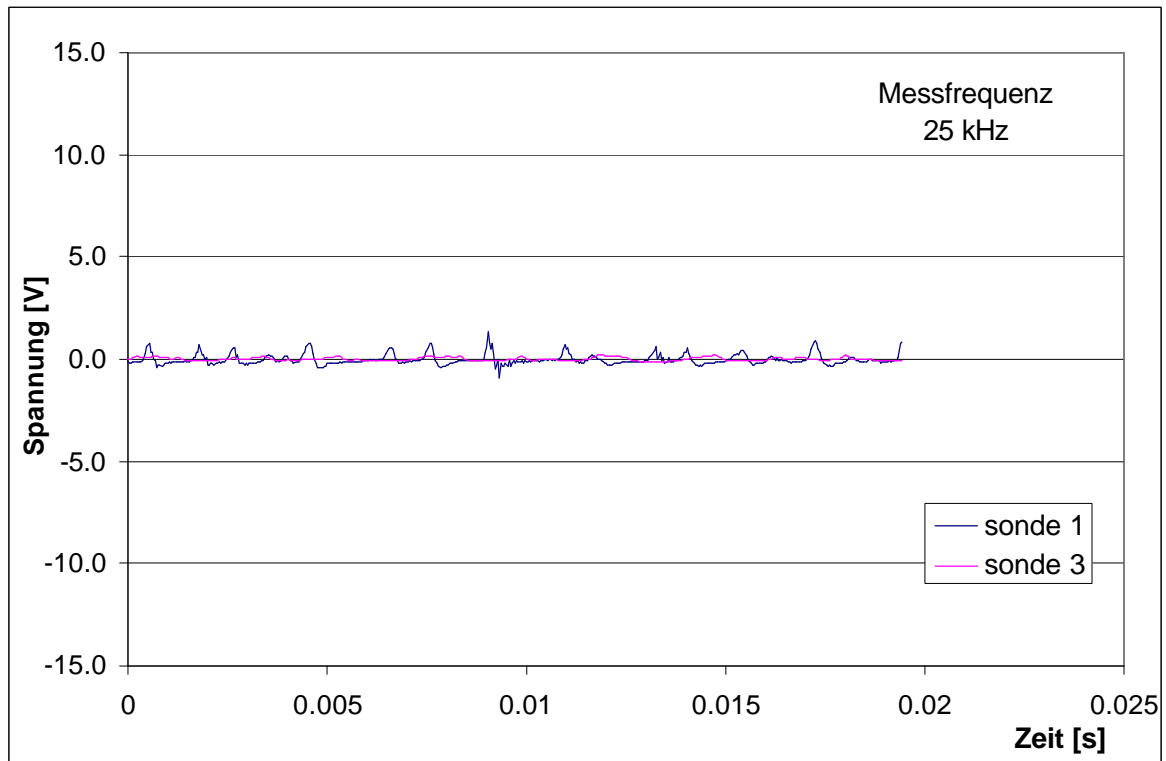
$$a = 2 \dots 18 \text{ m/s}^2.$$

gemessen und folgende Werte errechnet:

- Wegamplitude	$x_{\max.} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \dots 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m},$
- Schwingungsgeschwindigkeit	$v_{\max.} = 0,004 \dots 0,007 \text{ m/s},$
- spezifische Energie	$E = 6 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm/kg}.$

Die Dämpfung der Beschleunigung und aller weiteren daraus berechneten Werte an der Schichtgrenze Filterkies/anstehende Bodenformation demonstriert in diesem Falle eine deutliche Reflexion der Druckwelle an der Kontaktzone 2. Bemerkenswert dennoch, dass diese Schwingungen an sich bis in das natürliche Material hinein wirken (s. Abbildung 5-9).

Die **Abbildung 5-10** veranschaulicht den Dämpfungsprozess der Druckwellen auf dem Weg von Sonde 1 zu Sonde 3 durch die Darstellung des Schwingungsbildes.



**Abb. 5-10:** Schwingungsbild Hochdruckinnenspülung Sonden 1 und 3

#### 5.2.4 Doppelrotationsaggregat

Das Druckwellen-Impulsverfahren, das auf der Basis von Wasserhochdruck arbeitet, erzeugt infolge der extrem schnellen Umdrehungen der Doppelrotationsdüsen im Bereich der Arbeitsebene der beiden Doppeldüsen im Filterrohr einen Wasserdampfraum, der die Wassersäule im Brunnen um 1 ... 2 dm ansteigen lässt. Der Dampfraum ist als „Gasblase“ stabil und vermag einen vertikalen Wasserfluss im Brunnenrohr zu unterbinden. Der geringe Druck, den die Apparatur auf die Wassersäule ausübt, ließ erwarten, dass die Potenzialdrücke in der Filterkiesschicht ebenfalls klein blieben. Die Test der Apparatur in der Versuchsanlage VA 2 bestätigten diese Hypothese.

Auf eine Darstellung der Messergebnisse muss verzichtet werden, da die Absolutwerte der Messergebnisse einerseits sehr klein waren und andererseits durch die zwei Arbeitsebenen in den Potenzialfassungselementen keine klaren Bilder lieferten.

Die geringen Potenzialdifferenzen belegen, dass der Betrieb des Doppelrotationsdüsen systems in der Versuchsanlage nahezu keine Strömungsprozesse auszulösen vermag. Nahezu die gesamte Energie wird bei dieser Technologie für die Erzeugung der Dampfblase und die Druckwellen genutzt.



Bei den Tests der Doppelrotationsaggregate des JET Master Equipment in der VA 1 wurde mit mittlerem Betriebsdruck gearbeitet, d. h. ein Arbeitsdruckbereich wurde mit 300 ... 400 bar festgelegt. Dieser Bereich stellt für diese Technik einen Mittelwert dar.

Die Druckwellen, die dieses Gerät unter diesen Bedingungen zu erzeugen vermag, wurden wiederum im zentralen Filterkiesbereich, an der Kontaktzone Filterkies/anstehende Bodenformation und in der anstehenden Bodenformation gemessen. Nach diesem Test ergab sich folgendes Bild:

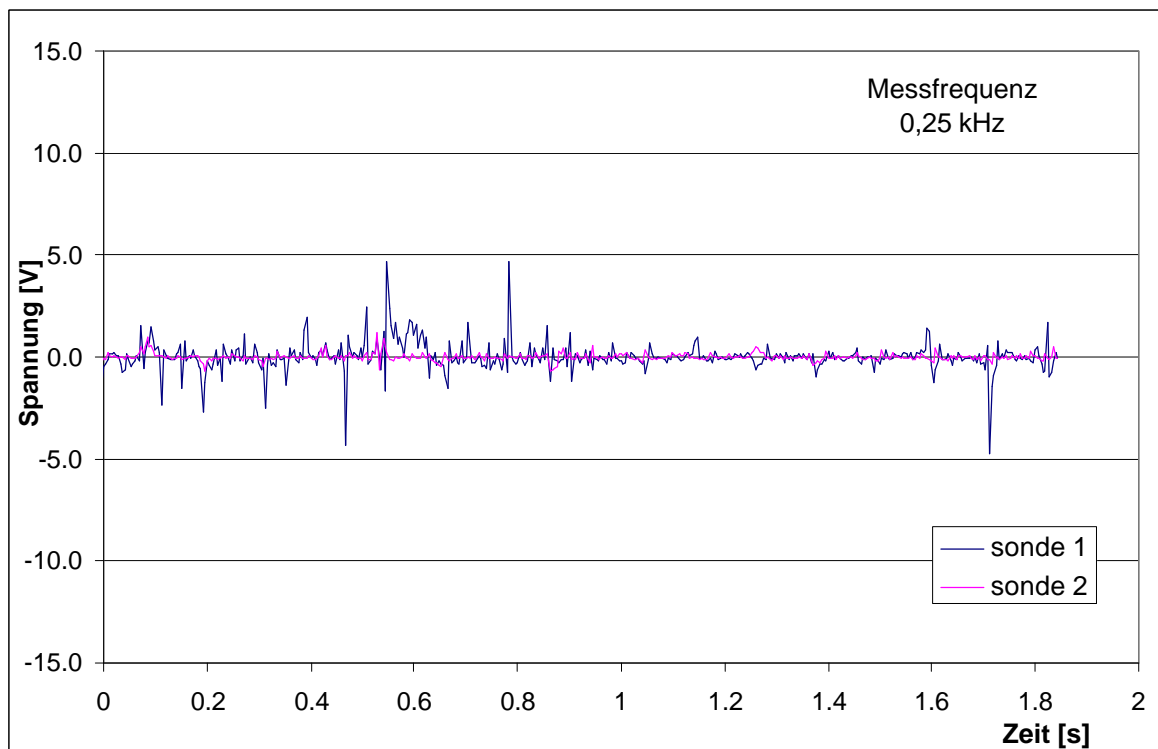
**Sonde 1:** Gemessen wurden Hauptfrequenzen von

$$f = 500 \text{ Hz}$$

und maximale Beschleunigungen von

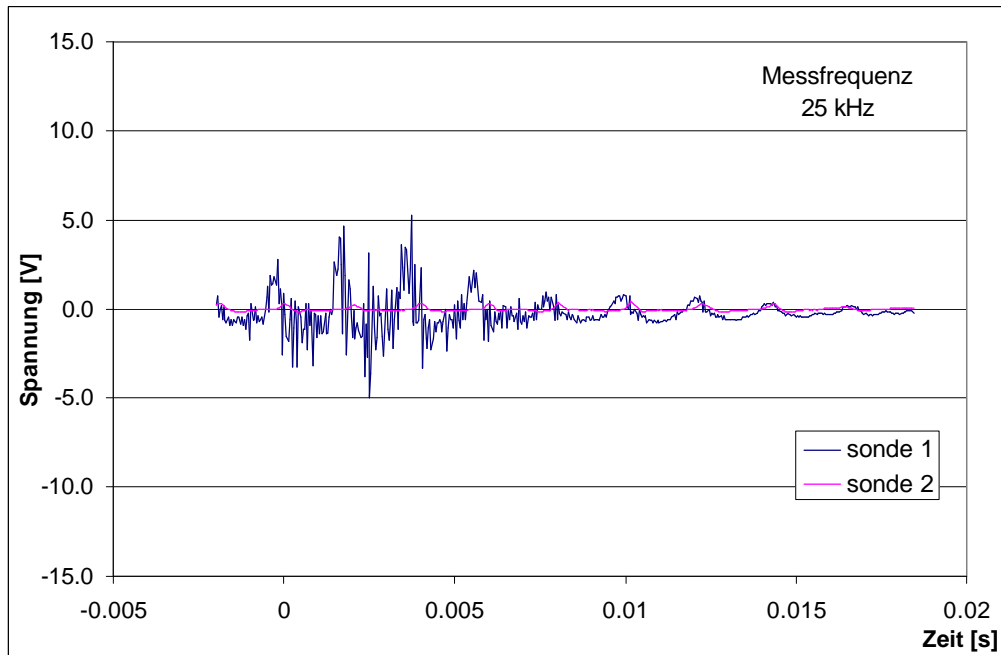
$$a = 200 \dots 300 \text{ m}^2/\text{s}.$$

Die **Abbildung 5-11** veranschaulicht die Schwingung, wie sie im Teststand ermittelt wurde. Auffallend ist in erster Linie, dass die Schwingung unregelmäßig verläuft, d. h. von Phasen mit relativ hohen Amplituden und Phasen mit kleinen Amplituden gebildet wird, wobei die Phasenverteilung keinen konstanten Rhythmus besitzt.

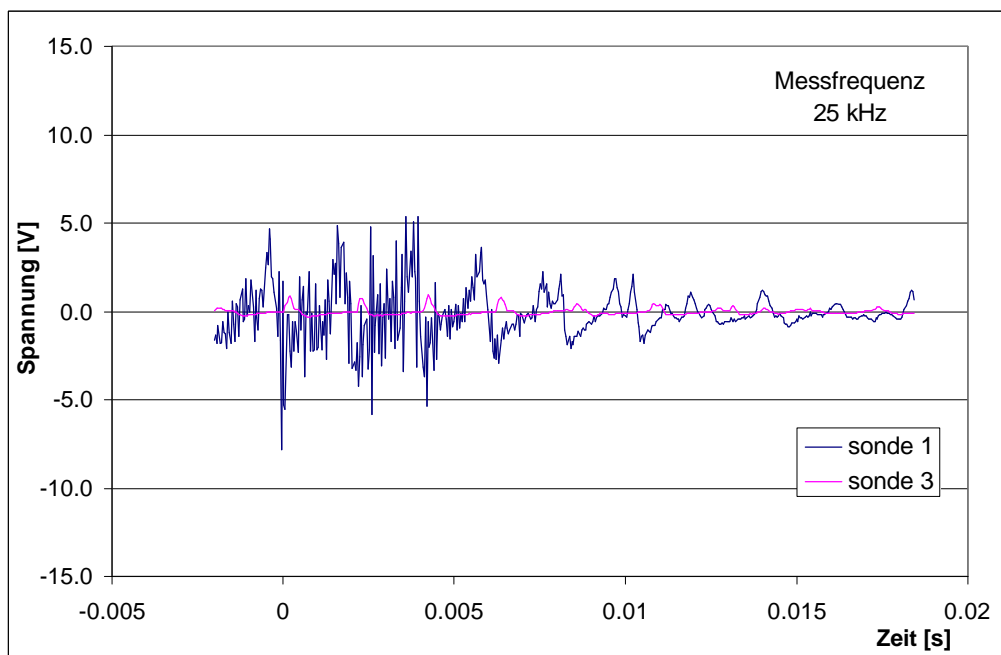


**Abb. 5-11:** Schwingungsbild Wasserhochdruck Sonden 1 und 2

Stellt man das Schwingungsbild, wie in **Abbildung 5-12** und **Abbildung 5-13** mit größerer zeitlicher Auflösung dar, wird diese Einschätzung von der Unregelmäßigkeit noch deutlicher.



**Abb. 5-12:** Schwingungsbild Wasserhochdruck Sonden 1 und 2



**Abb. 5-13:** Schwingungsbild Wasserhochdruck Sonden 1 und 3

Nutzt man diese Mittelwerte für die Berechnung der gerätetypischen Parameter, so ergeben sich

- |                        |                                       |
|------------------------|---------------------------------------|
| - max. Wegamplitude    | $2 \dots 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ , |
| - max. Geschwindigkeit | $0,06 \dots 0,1 \text{ m/s}$ ,        |
| - spezifische Energie  | $0,005 \text{ Nm/kg}$ .               |

### **Sonde 2**

Die Messergebnisse an der Kontaktzone Filterkies/Boden, zeigen erwartungsgemäß, dass die Frequenz der Schwingung auch hier den gleichen Wert von

$$\mathbf{f = 500 \text{ Hz}}$$

besitzt, dass aber doch die Beschleunigung gedämpft ist. Mit

$$\mathbf{a = 50 \dots 70 \text{ m/s}^2}$$

besitzt die Beschleunigung immer noch einen relativ hohen Wert. Das Dämpfungsgefälle lässt andererseits den Schluss zu, dass die Beschleunigung an der Filterrohraußenfläche Werte von  $400 \dots 500 \text{ m/s}^2$  betragen haben.

Aus den Messwerten ergaben sich die gerätetypischen Parameter wie folgt:

- |                                  |                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| - max. Wegamplitude              | $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ,       |
| - max. Geschwindigkeitsamplitude | $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ ,   |
| - spezifische Energie            | $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Nm/kg}$ . |

### **Sonde 3**

Die Messergebnisse veranschaulichen die Wirkung der Wellen im natürlichen Erdstoff. Mit

$$\mathbf{f = 500 \text{ Hz}}$$

wird wiederum die Stabilität der Wellen nachgewiesen und mit

$$\mathbf{a = 20 \dots 50 \text{ m/s}^2},$$

dass die Schichtgrenze eine deutliche Dämpfung mit sich bringt. Trotz der Dämpfung in der Schichtgrenze ist die Wirkung der Doppelrotationsdüse im Erdreich beachtenswert. Im realen Feldtest sind diese Schwingungen auch an der Erdoberfläche spürbar.

Die berechneten Parameter betragen:

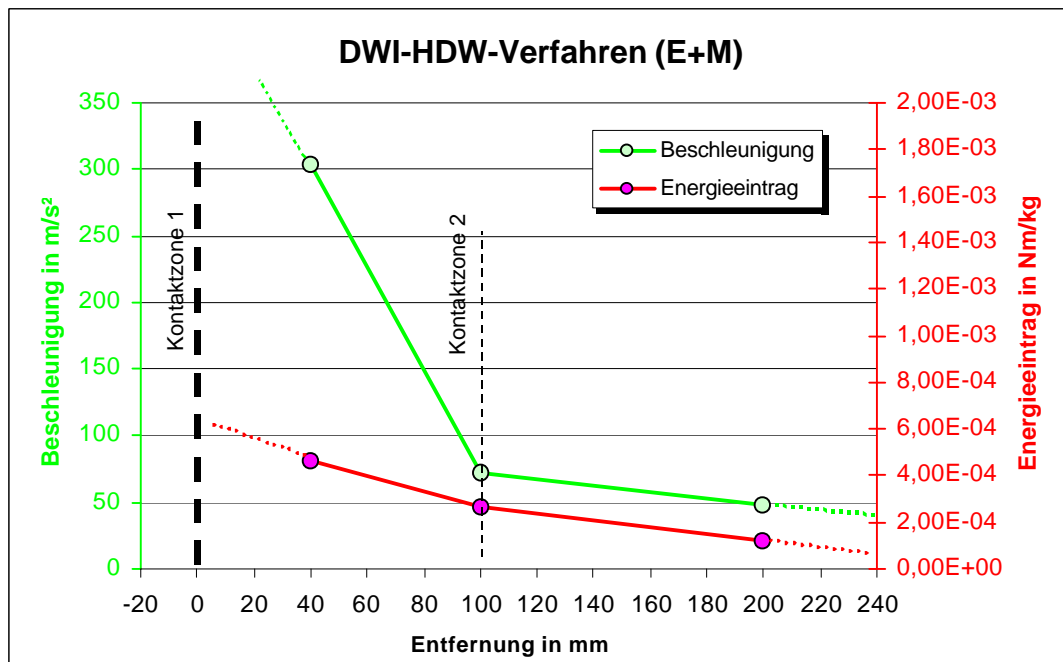
- |                                  |                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| - max. Wegamplitude              | $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ,     |
| - max. Geschwindigkeitsamplitude | $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ ,   |
| - spezifische Energie            | $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Nm/kg}$ . |

In **Tabelle 5-5** sind die Messwerte und die berechneten Parameter in Abhängigkeit vom Ort gegenübergestellt

**Tab. 5-5:** In der VA 1 gemessene Kennwerte des Doppelrotationsaggregates

Parameter	Dimension	Messwerte		
		Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3
Hauptfrequenz	Hz	500	500	500
Beschleunigung Hauptfrequenz	m/s <sup>2</sup>	303,5	72,8	48,6
max. Wegamplitude Hauptfrequenz	m	3,08E-05	7,38E-06	4,92E-06
Geschwindigkeit Hauptfrequenz	m/s	9,66E-02	2,32E-02	1,55E-02
spez. Energie Hauptfrequenz	Nm/kg	4,67E-03	2,69E-04	1,19E-04

Die **Abbildung 5-14** veranschaulicht noch einmal grafisch die enorme Beschleunigung, die das Aggregat unmittelbar an der Außenwand des Filterrohres zu erzeugen vermag.



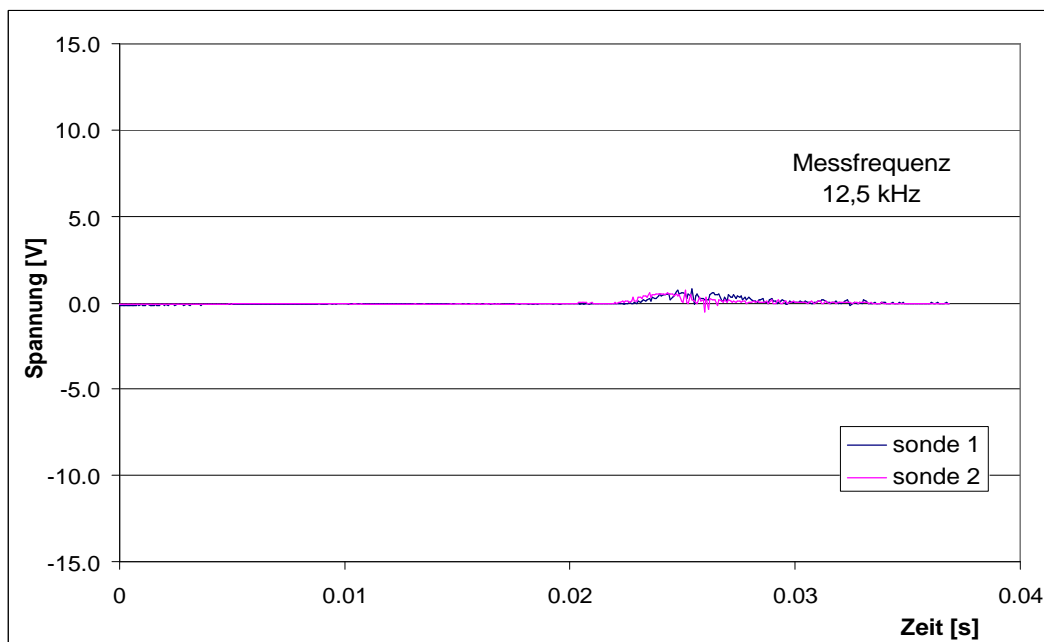
**Abb. 5-14:** Beschleunigungs- und Energieabbau des Doppelrotationsaggregates in Abhängigkeit vor Ort

## 5.2.5 Pulsator

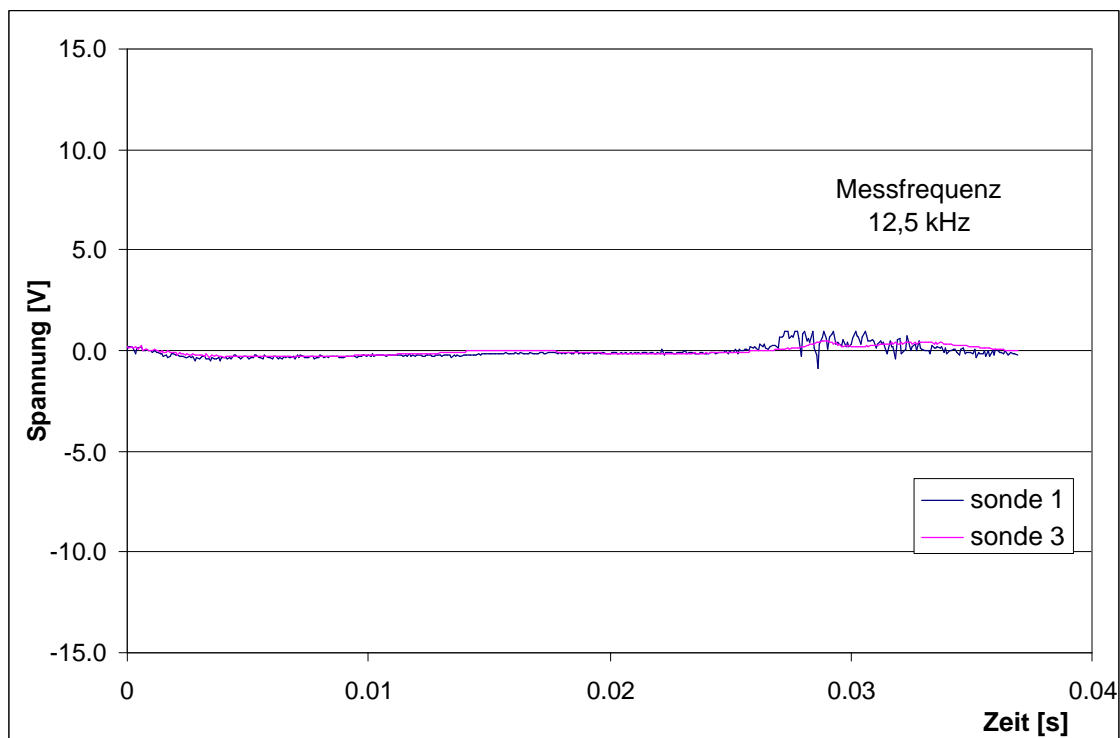
Bei dem Knallgasverfahren werden Schwingungen durch das Auslösen von Einzelimpulsen angeregt. Die Zeitdauer zwischen den Einzelimpulsen ist durch die Elektrolysezeit bedingt relativ lang (20 ... 60 Sekunden). Bei einer Ausschwingzeit von kleiner 1/10 s liegen somit echte Einzelimpulse vor.

Bei der Analyse der Schwingungsverhältnisse ist zu unterscheiden zwischen der Initialschwingung, die durch den auslösenden Impuls als einmalige Beschleunigungsspitze auftritt, und der hierdurch erregten sekundären Schwingung, die die Ausschwingphase charakterisiert.

Die **Abbildungen 5-15** und **5-16** zeigen charakteristische Schwingungsbilder eines Einzelpulses, welche beim Einsatz des Knallgasverfahrens am Versuchsstand aufgezeichnet wurden.



**Abb. 5-15:** Schwingungsbild Knallgasverfahren Sonden 1 und 2



**Abb. 5-16:** Schwingungsbild Knallgasverfahren Sonden 1 und 3

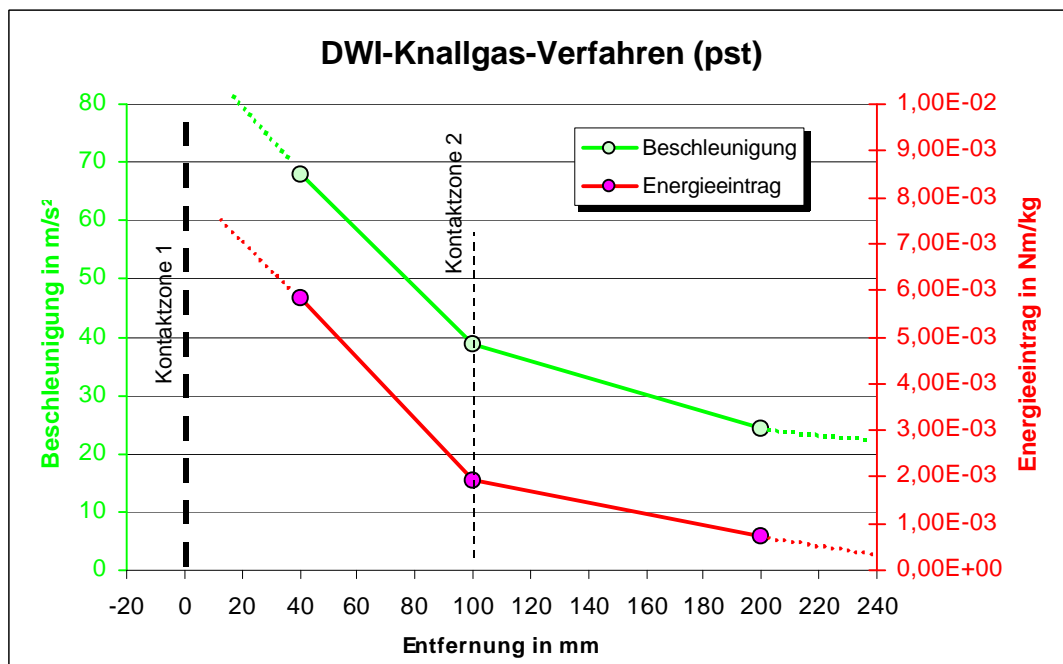
Im Ergebnis der Tests wurden die in **Tabelle 5-6** auszugsweise dargestellten Messergebnisse ermittelt.

**Tab. 5-6:** In der VA 1 ermittelte Kennwerte des Pulsators

Parameter	Dimension	Messwerte		
		Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3
Messorte				
Hauptfrequenz	Hz	100	100	100
Nebenfrequenz	Hz	3000	3000	3000
Beschleunigung Hauptfrequenz	m/s <sup>2</sup>	68,0	38,9	24,3
Beschleunigung Nebenfrequenz	m/s <sup>2</sup>	48,6	29,1	14,6
max. Wegamplitude Hauptfrequenz	m	1,72E-04	9,84E-05	6,15E-05
max. Wegamplitude Nebenfrequenz	m	1,37E-07	8,20E-08	4,10E-08
Geschwindigkeit Hauptfrequenz	m/s	1,08E-01	6,18E-02	3,86E-02
Geschwindigkeit Nebenfrequenz	m/s	2,58E-03	1,55E-03	7,73E-04
spez. Energie Hauptfrequenz	Nm/kg	5,85E-03	1,91E-03	7,47E-04
spez. Energie Nebenfrequenz	Nm/kg	3,32E-06	1,19E-06	2,99E-07

Als interessanten Nebeneffekt veranschaulichen die Messungen, dass auf der Hauptschwingung eine sehr hochfrequente Nebenschwingung aufliegt, die zwar noch nicht als Ultraschallschwingung einzuordnen ist, aber dieser mit 10.000 Herz sehr nahe kommt.

Die **Abbildung 5-17** veranschaulicht grafisch, in welchem Maße der Abbau der Geräteparameter mit der Zunahme der Entfernung vom Filterrohr vorstatten geht.



**Abb. 5-17:** Beschleunigungs- und Energieabbau des Pulsators in Abhängigkeit vor Ort

## 5.2.6 Impulsgenerator (pigadi)

Auch beim Gaskompressionsverfahren werden Schwingungen durch Einzelimpulse erregt. Trotz deutlich höherer Einzelimpulsfrequenz als beim Knallgasverfahren ist der Abstand zwischen den Einzelimpulsen deutlich größer als die Ausschwingzeit des Druck-Einzelimpulses.

Unter den Bedingungen des Versuchstandes erzielte dieses Verfahren zumindest bei der Initialschwingung mit Abstand die stärksten Schwingungen aller untersuchten Verfahren. Die aus den Schwingungsdaten ermittelte Hauptfrequenz des Initialstoßes beträgt etwa 200 Hz. Die Druckwellen erreichten entlang der Messstrecke Beschleunigungen von

$$a = 500 \text{ bis } 1000 \text{ m/s}^2$$

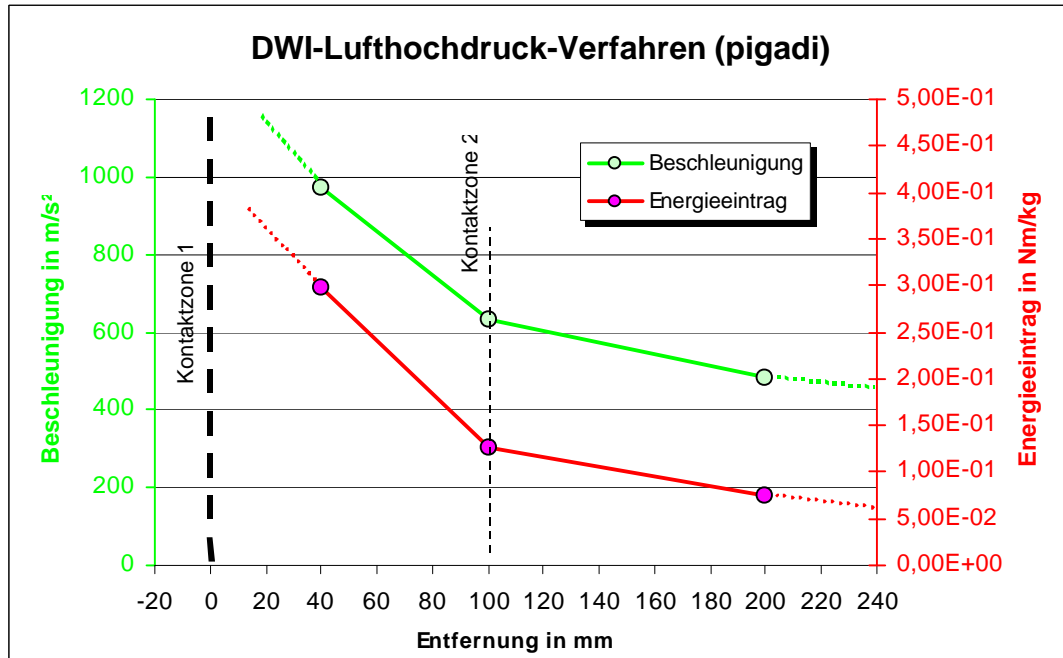
Aus diesen Werten lässt sich eine Schwingungsamplitude von  $6 \dots 3 \cdot 10^{-4}$  m errechnen. Die ermittelten maximalen Schwinggeschwindigkeiten liegen bei  $0,8 \dots 0,4$  m/s, die spezifische Energie wurde wie die in **Tabelle 5-7** aufgelistet ermittelt.

**Tab. 5-7:** In der VA 1 gemessenen Kennwerte des Impulsgenerators

Parameter	Dimension	Messwerte		
		Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3
Messorte				
Hauptfrequenz	Hz	200	200	200
Nebenfrequenz	Hz	10000	10000	10000
Beschleunigung Hauptfrequenz	m/s <sup>2</sup>	971,3	631,3	485,6
Beschleunigung Nebenfrequenz	m/s <sup>2</sup>	777,0	485,6	291,4
max. Wegamplitude Hauptfrequenz	m	6,15E-04	4,00E-04	3,08E-04
max. Wegamplitude Nebenfrequenz	m	1,97E-07	1,23E-07	7,38E-08
Geschwindigkeit Hauptfrequenz	m/s	7,73E-01	5,02E-01	3,86E-01
Geschwindigkeit Nebenfrequenz	m/s	1,24E-02	7,73E-03	4,64E-03
spez. Energie Hauptfrequenz	Nm/kg	2,99E-01	1,26E-01	7,47E-02
spez. Energie Nebenfrequenz	Nm/kg	7,65E-05	2,99E-05	1,08E-05

Die **Abbildung 5-18** veranschaulicht grafisch, in welchem Maße der Abbau der Effekte der Geräte mit der Zunahme der Entfernung vom Filterrohr vonstatten geht.



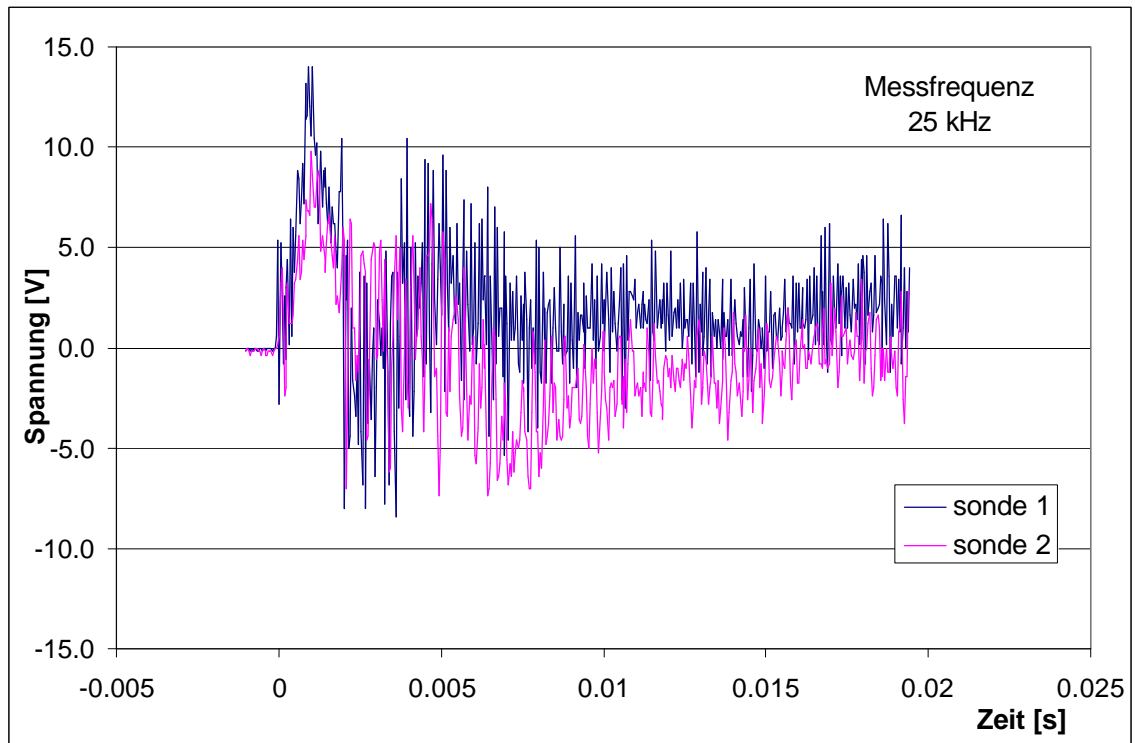


**Abb. 5-18:** Beschleunigungs- und Energieabbau des Impulsgenerators in Abhängigkeit der Entfernung vom Filterrohr

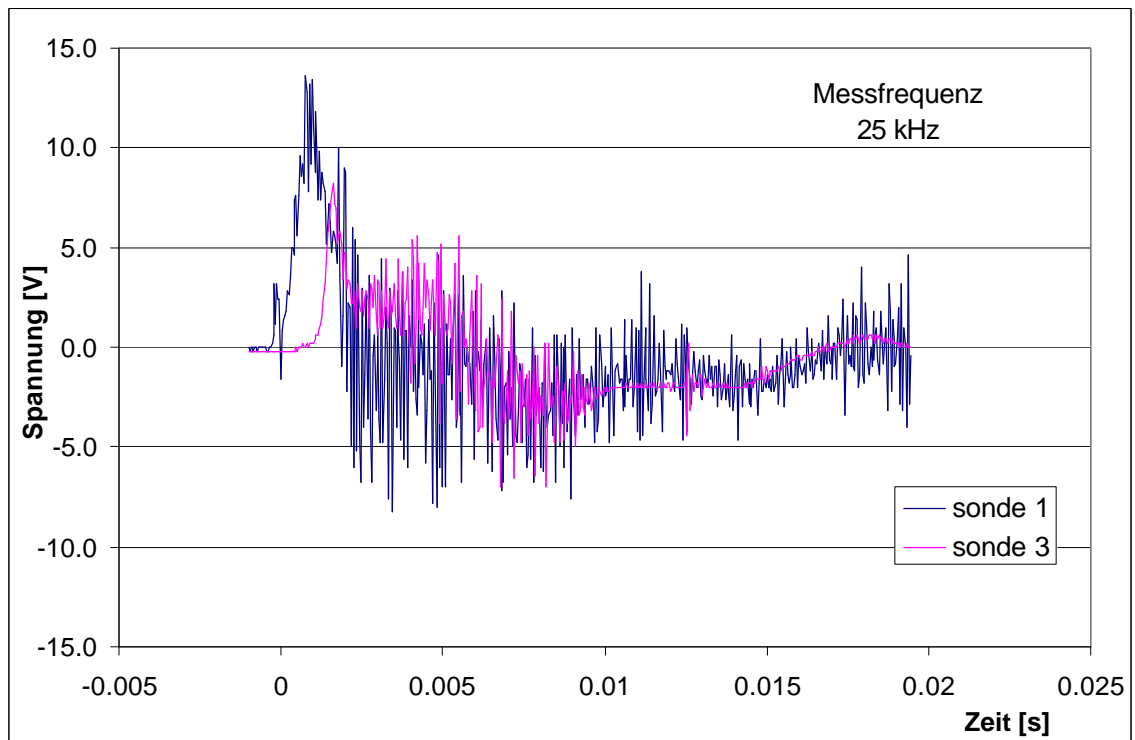
Im Versuchsstand initialisierte der Impulsgenerator auch eine sekundäre Schwingung mit einer hohen Frequenz von ca. 10 kHz und immer noch sehr starken Beschleunigungen von bis zu 600 ... 800 m/s<sup>2</sup>, die unbedingt in dem hochfrequenten Bereich eingeordnet werden muss.

Die Messergebnisse bestätigen die Grundsätze der Petrophysik, nach denen der Absorptionskoeffizient eines Gesteines, d. h. die Dämpfung der Schwingung, mit abnehmender Frequenz einer eindringenden Welle sinkt und erklärt damit im Umkehrschluss die verhältnismäßig geringe Dämpfung dieser Effekte.

In den **Abbildungen 5-19** und **5-20** ist das typisches Schwingverhalten, wie es beim Einsatz des Gaskompressionsverfahrens mit einem Auslösedruck von 460 bar am Versuchsstand auftrat, dargestellt. Deutlich ist die Initialschwingung und das Ausschwingverhalten zu erkennen.



**Abb. 5-19:** Schwingungsbild Gaskompressionsverfahren Sonden 1 und 2



**Abb. 5-20:** Schwingungsbild Gaskompressionsverfahren Sonden 1 und 3

## 5.2.7 Impulsgenerator (AQUAPLUS)

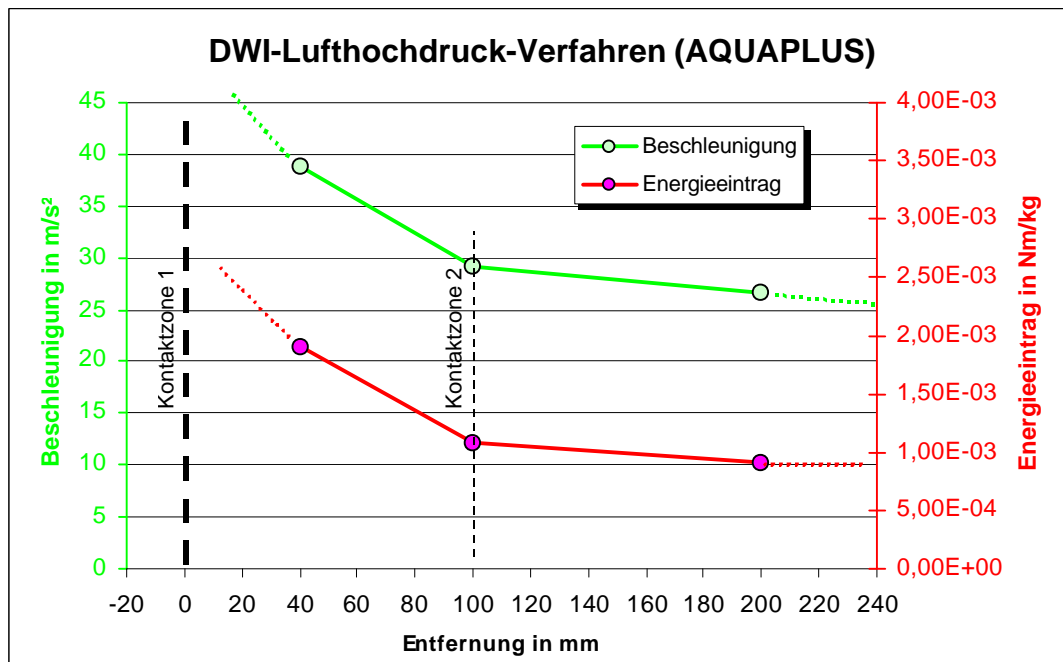
Vom Prinzip her ist die Gerätevariante von AQUAPLUS ähnlich, im Detail jedoch gegenüber dem Impulsgenerator von pigadi unterschiedlich gestaltet.

Unter den Bedingungen des Versuchsstandes VA 1 wurden für diesen Impulsgenerator die in **Tabelle 5-5** aufgeführten Parameter gemessen bzw. errechnet.

**Tab. 5-5:** Kennwerte des Impulsgenerators AQUAPLUS

Parameter	Dimension	Messwerte		
		Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3
<b>Messorte</b>				
Hauptfrequenz	Hz	100	100	100
Nebenfrequenz	Hz	1000	1000	1000
Beschleunigung Hauptfrequenz	m/s <sup>2</sup>	38,9	29,1	26,7
Beschleunigung Nebenfrequenz	m/s <sup>2</sup>	17,0	15,1	13,1
max. Wegamplitude Hauptfrequenz	m	9,84E-05	7,38E-05	6,77E-05
max. Wegamplitude Nebenfrequenz	m	4,31E-07	3,81E-07	3,32E-07
Geschwindigkeit Hauptfrequenz	m/s	6,18E-02	4,64E-02	4,25E-02
Geschwindigkeit Nebenfrequenz	m/s	2,71E-03	2,40E-03	2,09E-03
spez. Energie Hauptfrequenz	Nm/kg	1,91E-03	1,08E-03	9,04E-04
spez. Energie Nebenfrequenz	Nm/kg	3,66E-06	2,87E-06	2,18E-06

Die **Abbildung 5-21** veranschaulicht schematisch, in welchem Maß die Geräteeffekte mit der Zunahme der Entfernung vom Filterrohr vorstatten geht.



**Abb. 5-21:** Beschleunigungs- und Energieabbau des Impulsgenerators in Abhängigkeit von der Entfernung vom Brunnen

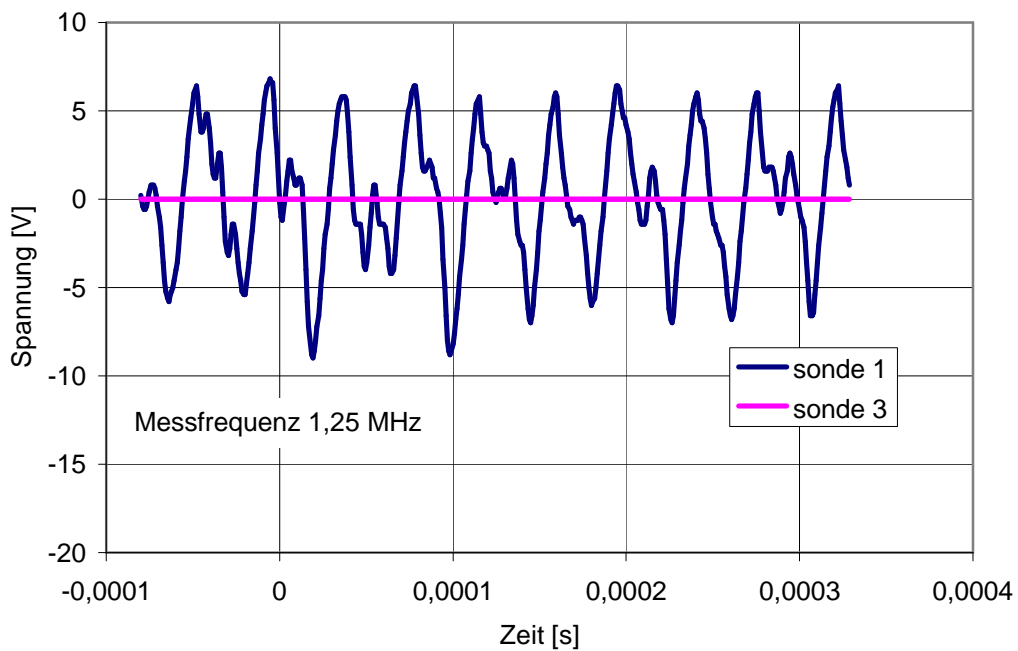
Auch bei der Schwingung dieses Aggregates liegt auf der Hauptschwingung eine Nebenschwingung auf, die im hochfrequenten Bereich liegt.

### 5.2.8 Ultraschall-Sonden

Die beiden getesteten Geräte zur Brunnenregenerierung mit Ultraschall lieferten sehr ähnliche Ergebnisse, so dass für die Bewertung des Verfahrens beide Geräte gemeinsam betrachtet werden können.

Beim Ultraschalleinsatz werden pulsierend permanente Schwingungen erzeugt und in das Brunnenumfeld abgestrahlt.

Abbildung 5-12, aufgezeichnet mit relativ niedriger Messfrequenz, zeigt den ruhig pulsierenden Charakter des Ultraschalleintrages. Die **Abbildung 5-22** zeigt das typische Schwingungsbild beim Einsatz des Ultraschallverfahrens bei hoher zeitlicher Auflösung.



**Abb. 5-22:** Pulsierender Charakter des Ultraschalleintrages

Die **Tabelle 5-6** veranschaulicht die Messwerte der Tests mit der Vormann-Sonde.

**Tab. 5-6:** Messwerte mit der Erdmann-Sonde

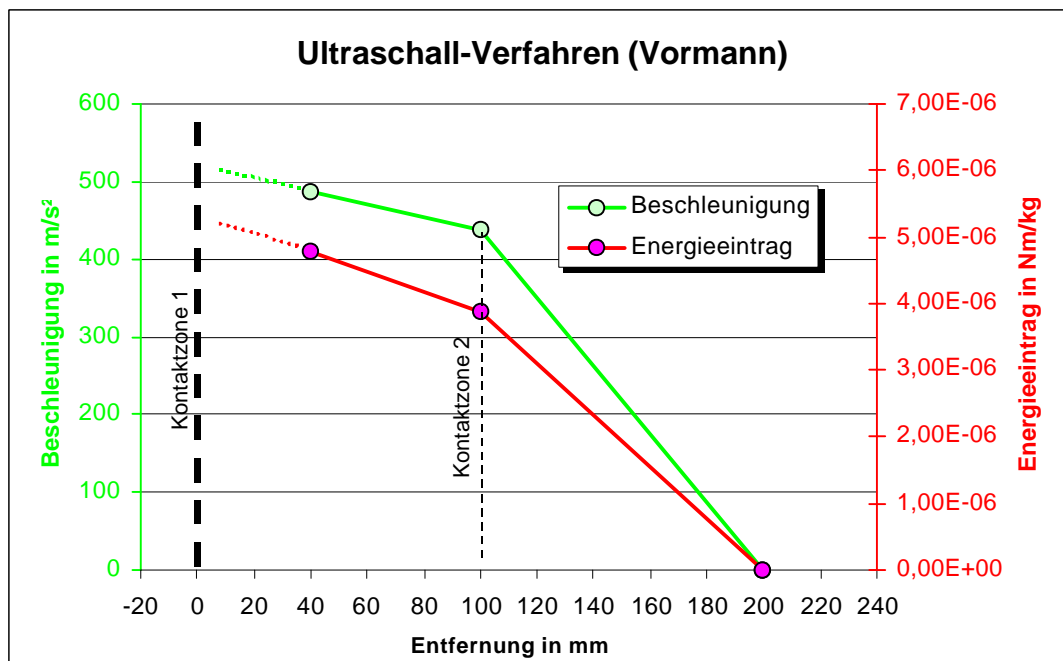
Parameter	Dimension	Messwerte		
		Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3
Messorte				
Hauptfrequenz	Hz	25000	25000	25000
Beschleunigung Hauptfrequenz	m/s <sup>2</sup>	485,6	437,1	0,0
max. Wegamplitude Hauptfrequenz	m	1,97E-08	1,77E-08	1,97E-12
Geschwindigkeit Hauptfrequenz	m/s	3,09E-03	2,78E-03	3,09E-07
spez. Energie Hauptfrequenz	Nm/kg	4,78E-06	3,87E-06	4,78E-14

Die **Tabelle 5-7** veranschaulicht die Messwerte der Tests mit der Sonic-Sonde.

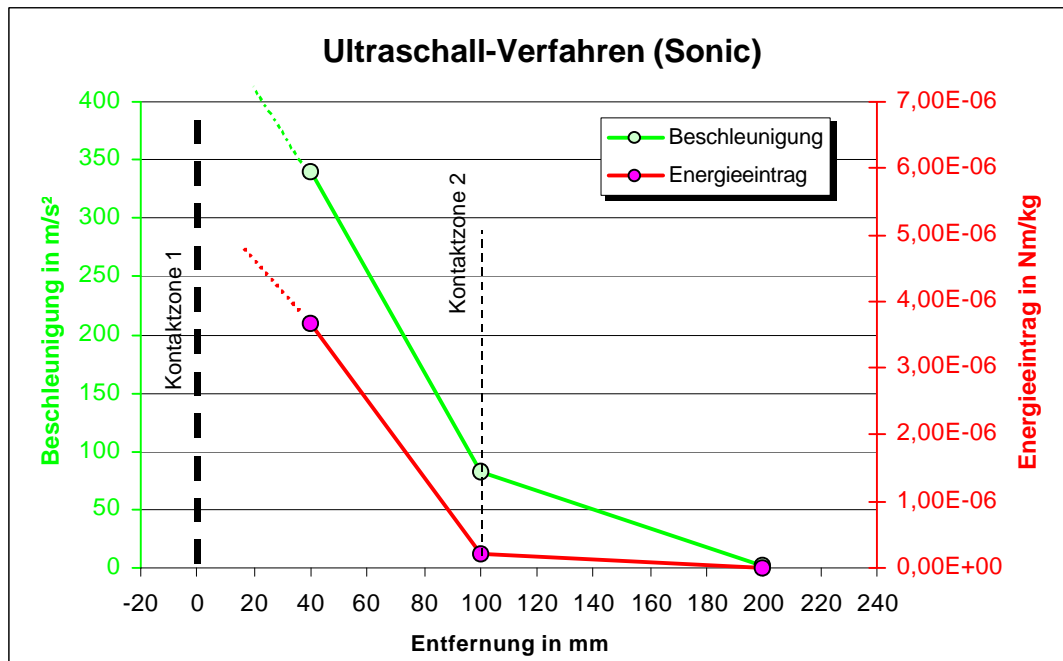
**Tab. 5-7:** Messwerte mit der Sonic-Sonde

Parameter	Dimension	Messwerte		
		Sonde 1	Sonde 2	Sonde 3
Messorte				
Hauptfrequenz	Hz	20000	20000	20000
Beschleunigung Hauptfrequenz	m/s <sup>2</sup>	340,0	82,6	1,8
max. Wegamplitude Hauptfrequenz	m	2,15E-08	5,23E-09	1,17E-10
Geschwindigkeit Hauptfrequenz	m/s	2,71E-03	6,57E-04	1,47E-05
spez. Energie Hauptfrequenz	Nm/kg	3,66E-06	2,16E-07	1,08E-10

Die **Abbildungen 5-23** und **5-24** veranschaulichen die Dämpfungsprozesse graphisch.



**Abb. 5-23:** Veranschaulichung der gemessenen Beschleunigung und des erreichten spezifischen Energieeintrages der Erdmann-Sonde



**Abb. 5-24:** Veranschaulichung der gemessenen Beschleunigung und des erreichten spezifischen Energieeintrages der Sonic-Sonde

Die Darstellungen veranschaulichen die Stabilität und die Effekte der Schallwellen innerhalb der Filterkiesschüttung und die hohe Reflexionswirkung/Dämpfung der Schichtgrenze Filterkies/anstehende Bodenformation unter den Bedingungen des Versuchsstandes.

### 5.2.9 Mehrkammergeräte (hydraulische Aspekte)

In der Versuchsanlage V2 wurde der Kieswäscher der Fa. AQUA BRUNNEN SERVICE Regeneriertechnik GmbH München im Hinblick auf seine hydraulischen Effekte getestet.

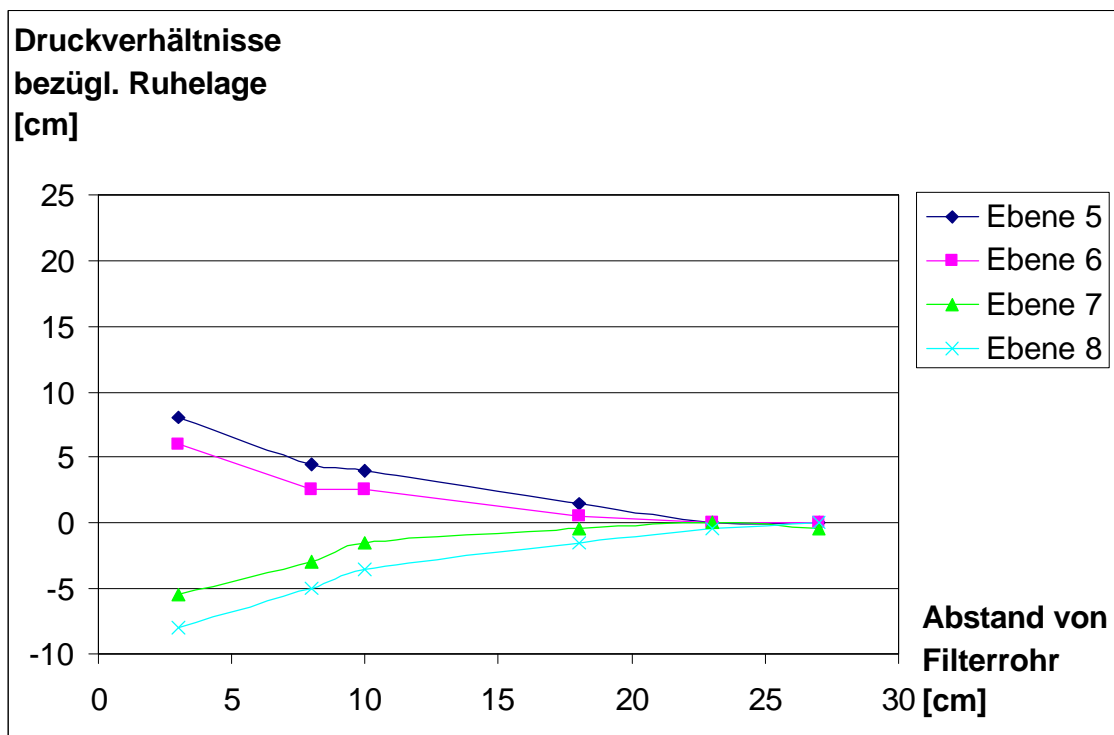
Beim getesteten Gerät zeigte sich eine Potenzialerhöhung gegenüber dem Ruhezustand von 0,05 ... 0,10 m im Druckbereich sowie eine Druckreduzierung von ebenfalls 0,05 ... 0,10 m im Saugbereich. Hierbei wurde die gesamte vertikale Ausdehnung des Mehrkammergerätes trotz Schichtstärken-Überdimensionierung der einfachen Kiesschüttung nahezu gleichmäßig beaufschlagt. **Tabelle 5-8** enthält die beim Test dieses Gerätes erfassten Daten.

**Tab. 5-8:** Messdaten Potenzialverhältnisse Mehrkammergerät

Werte Potenzialaufnehmer bezügl. Ruhelage [cm]

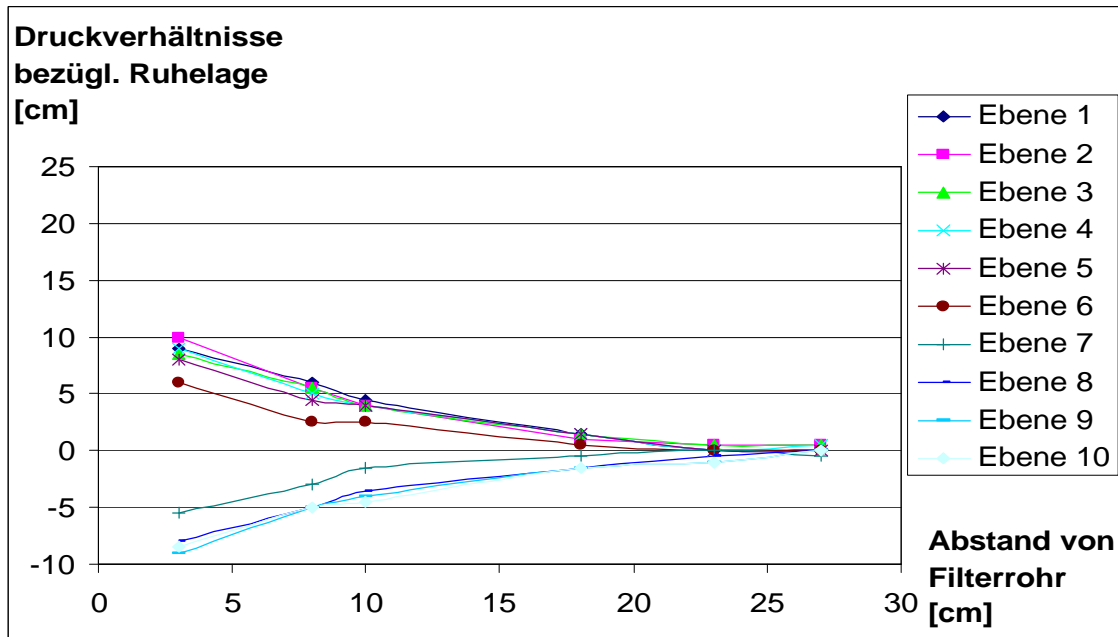
vertikale Ebene der Potenzialaufnehmer	Höhe bezügl. Mittelachse	links		rechts		links		rechts		horizontale Anordnung der Potenzialaufnehmer
		3	2	2	3	1	1	1	1	
		3	8	10	18	23	27	Abstand von Filterrohr		
1	58.5	9	6	4.5	1.5	0	0			Einspeisebereich
2	56	10	5.5	4	1	0.5	0.5			
3	43.5	8.5	5.5	4	1.5	0.5	0.5			
4	31	9	5	4	1.5	0	0.5			
5	18.5	8	4.5	4	1.5	0	0			
6	6	6	2.5	2.5	0.5	0	0			
7	-6.5	-5.5	-3	-1.5	-0.5	0	-0.5			Entnahmebereich
8	-19	-8	-5	-3.5	-1.5	-0.5	0			
9	-31.5	-9	-5	-4	-1.5	-1	0			
10	-44	-8.5	-5	-4.5	-1.5	-1	0			
11	-56.5	-8	-4.5				-1			

Die grafische Darstellung dieser Messwerte veranschaulicht noch einmal deutlich, wie tief das Mehrkammergerät in eine Kiesschüttung einzudringen vermag und damit dem Anliegen der Spülung der Filterkiesschicht umfassend gerecht werden kann (s. **Abbildungen 5-25** und **5-26**).



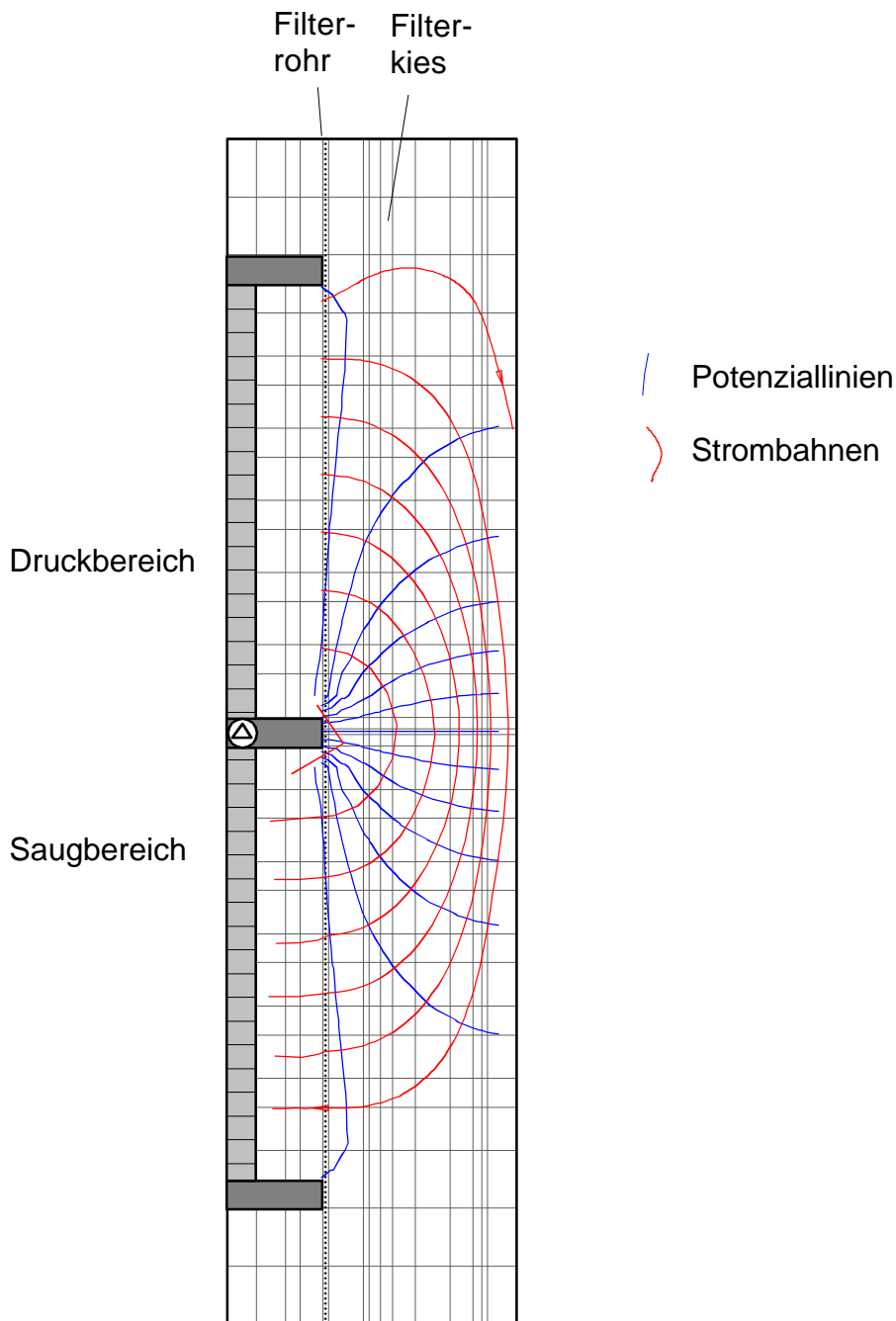
**Abb. 5-25:** Potenzialverhältnisse eines Mehrkammergerätes mittlere Messebenen





**Abb. 5-26:** Potenzialverhältnisse eines Mehrkammergerätes alle Messebenen

In der **Abbildung 5-27** sind diese Werte zur Darstellung des Strömungsbildes genutzt. Die Darstellung veranschaulicht, wie einerseits der gesamte Raum relativ gut durchströmt wird und andererseits, dass die kurzen Wege deutlich stärker durchströmt werden, als die Außenbereiche.



**Abb. 5-27:** Strömungsverhältnisse eines Mehrkammergerätes, modelliert

Auch wenn die Darstellung in der Abbildung 5-28 ggf. suggeriert, dass diese Technik auch für die mechanische Brunnenregenerierung eingesetzt werden könnte, da sie die tiefen Zonen der Filterkiesschüttung erreicht, sind diese Geräte nicht für die mechanische Regenerierung konzipiert. Sie entfalten ihre volle Wirkung durch die hydraulische Transportunterstützung im Zusammenhang mit dem Chemikalieneinsatz bei der chemischen Brunnenregenerierung.

## 6 Mathematische Nachweise

### 6.1 Strömungsmodell

Für die Modellierung der Strömungsprozesse im brunnennahen Raum wurde das Programm

#### ASM (Aquifer-Simulations-Modell)

[KINZELBACH 1995] genutzt.

ASM ist ein 2-D-Grundwasserströmungs- und Transportmodell. Es kann horizontal oder vertikal eben eingesetzt werden. Zur Lösung der Strömungsgleichung wird das Differenzen-Verfahren benutzt, wobei die Systemgleichungen wahlweise mit dem Verfahren der konjugierten Gradienten oder dem IADI-Verfahren gelöst werden können. Das Modellnetz kann eine Größe von bis zu  $80 \times 80 = 6.400$  Zellen besitzen, die eine Quadrat- bzw. Rechteckform haben müssen. Diese Voraussetzung war bei dieser Aufgabe erfüllt.

Die zwei wichtigen Elemente der Parametrisierung des Modells sind die k-Werte des Filterkieses und des Filterrohres. Für deren Bestimmung werden die in [KLOTZ 1975] dokumentierten Versuchsergebnisse genutzt.

Die **Tabelle 6-1** zeigt die k-Werte von unterschiedlichen Kieskörnungen und die **Tabelle 6-2** die k-Werte von Schlitzbrückenfiltern, Wickeldrahtfiltern und Kunststofffiltern mit verschiedenen Schlitzweiten.

Die in Tabelle 6-1 enthaltenen Filterkiese entsprechen nicht den genormten Größen nach DIN 4924, so dass diese Werte interpoliert werden müssen. Die in den Tabellen gesondert gekennzeichneten Zeilen und Spalten markieren die Werte, die den Realwerten nahe kommen.

**Tab. 6-1:** k-Werte von Filterkiesen

k [cm/s]	Körnung [mm]
1	1 – 2
5	2 – 4
10	3 – 7
50	7 - 15

**Tab. 6-2:** *k*-Werte von Brunnenfiltern

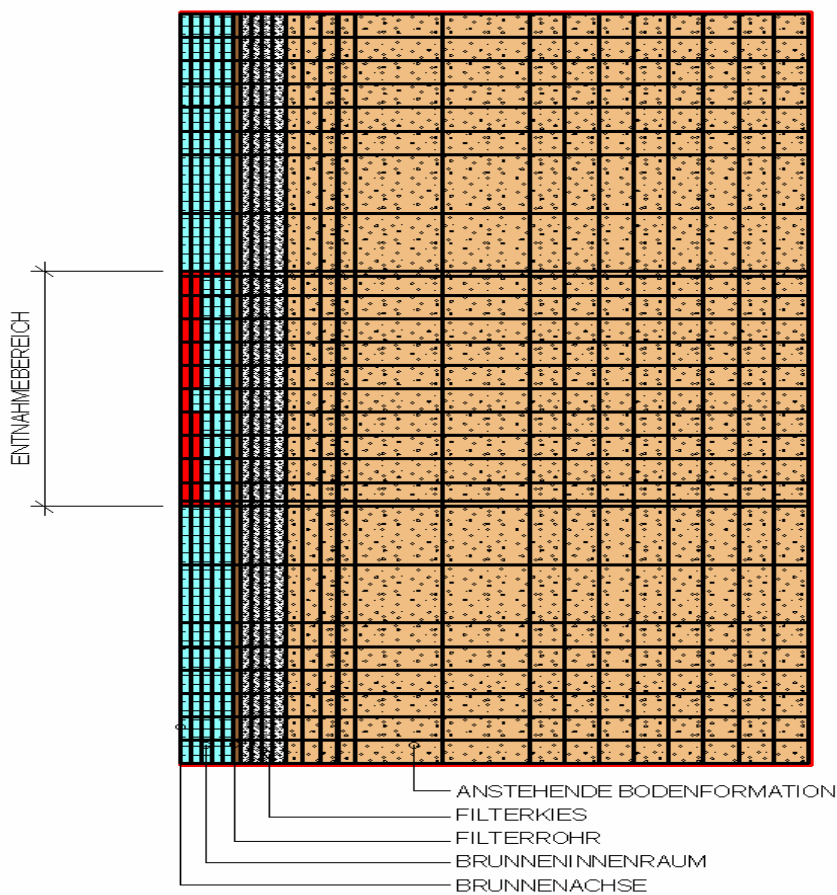
**Schlitzbrückenfilter**

Brückenöffnung [mm]	1,0	1,5	2,0	2,5
<i>k</i> [cm/s]	1,8	2,7	3,6	4,5

**Wickeldrahtfilter**

Schlitzweite [mm]	0,5	1,0	2,0	3,0
<i>k</i> [cm/s]	2,5	5,3	11,6	16

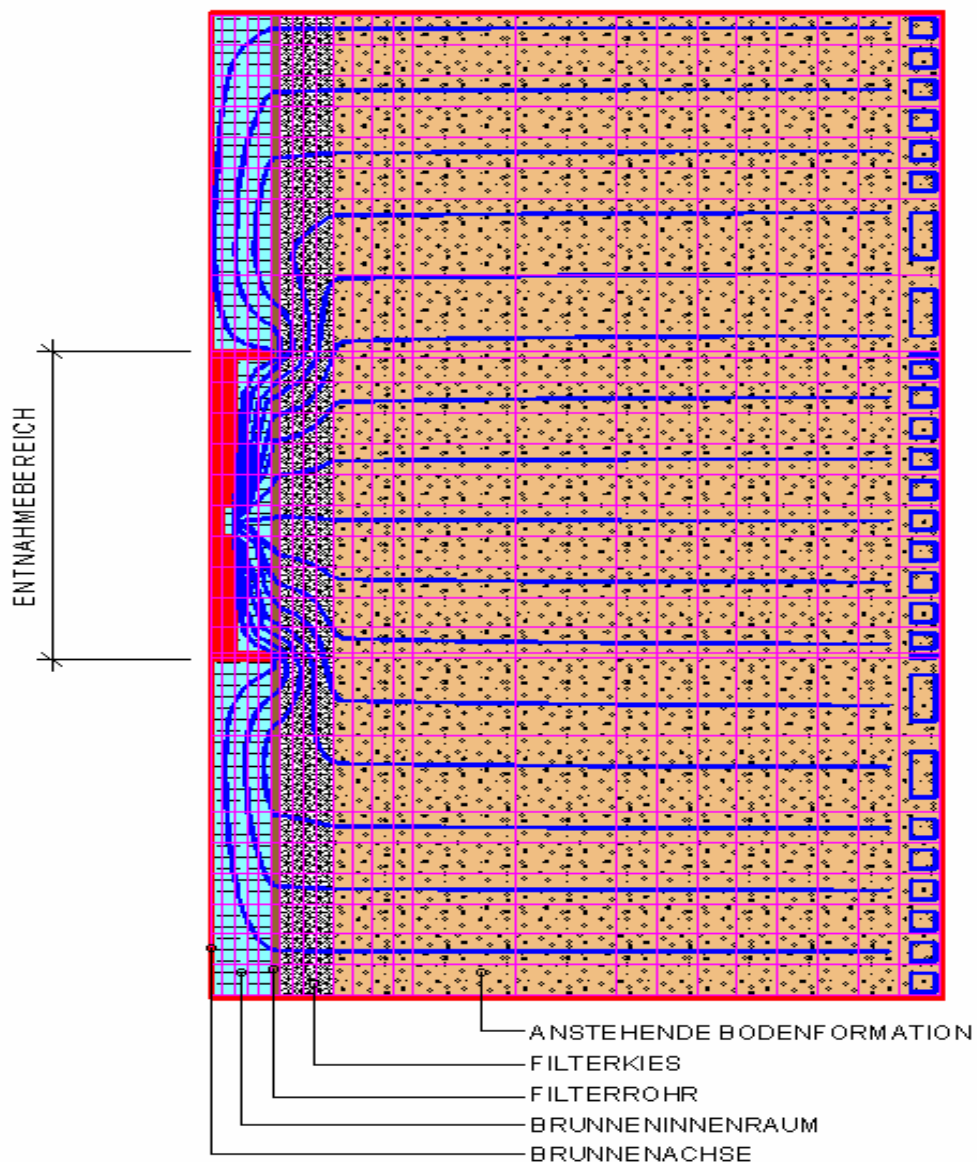
Das Strömungsfeld wurde wie folgt diskretisiert (s. **Abbildung 6-1**):



**Abb. 6-1:** *Diskretisierung des Strömungsfeldes*

## 6.2 Seiher

Mit dem Strömungsmodell sollte der Nachweis der Anströmung des Gerätes unter realen Bedingungen veranschaulicht werden. Für den Vertikalfilterbrunnen mit einfacher Filterkiesschüttung, wie er in der Praxis im Allgemeinen realisiert wird, ergab sich ein Strömungsbild, wie es in der **Abbildung 6-2** dargestellt ist.



**Abb. 6-2:** Stromlinienverlauf bei der Intensiventnahme aus einem Vertikalfilterbrunnen mit einfacher Filterkiesschüttung

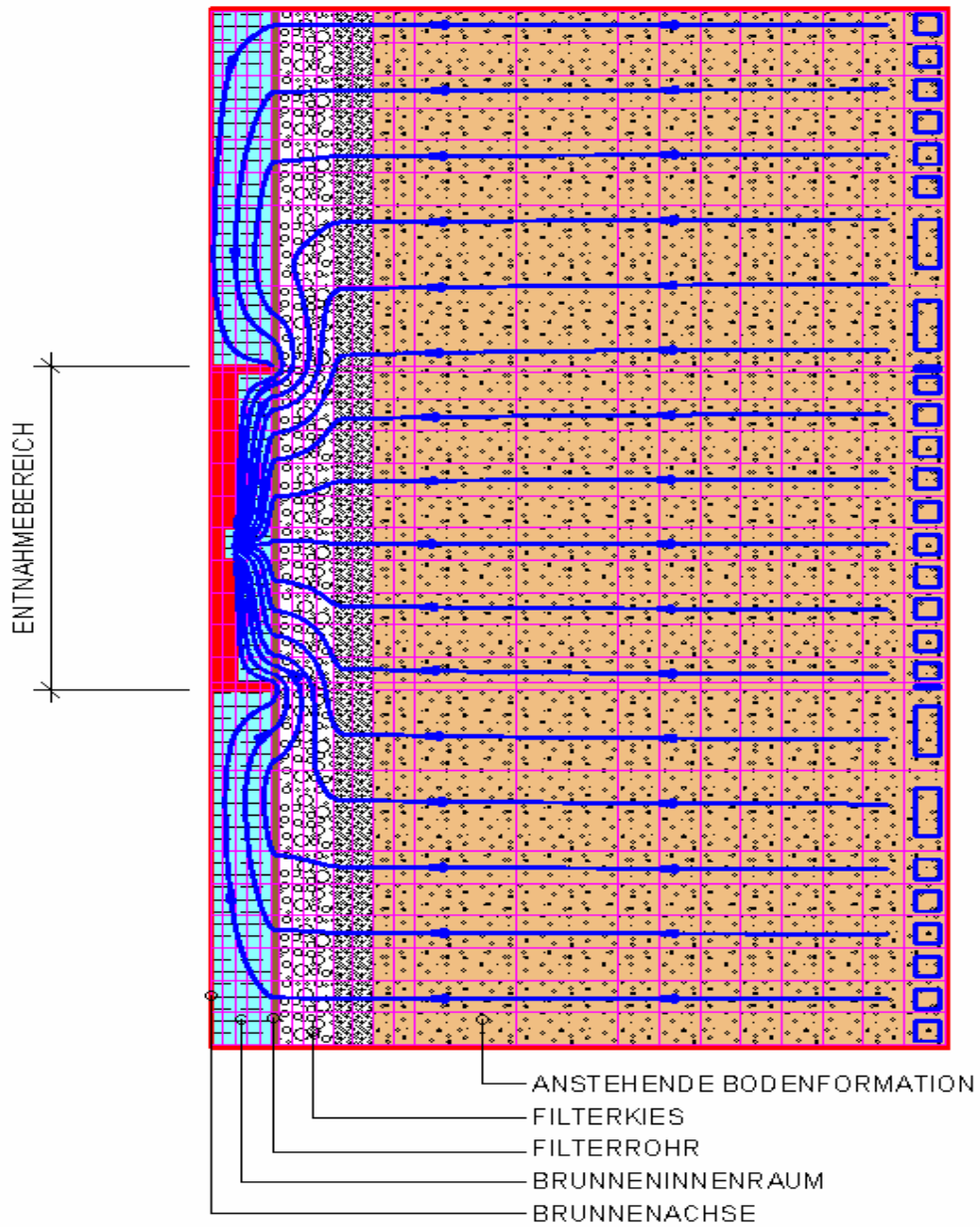
Die Abbildung 6-2 veranschaulicht, dass

- die Filterkiesschicht die Entnahmemenge der Intensiventnahme gleichmäßig auf die anstehende Bodenformation verteilt und die Seihlänge durch die hohe Durchlässigkeit des Filterkieses praktisch keine Rolle spielt,
- in Höhe der Packer der Bereich der Filterkiesschüttung intensiv vertikal gespült wird und der horizontale Anstrom im Entnahmebereich deutlich kleiner ist als dies bisher erwartet wurde,
- die Kontaktzone 2, also der Übergang vom Filterkies zu anliegenden Bodenformen wird im Bereich der abgepackten Zone nicht stärker angeströmt als die Filterkiesbereiche über/oder unter der abgepackten Zone.

Alle Effekte zusammenfassend stellt sich damit die Intensiventnahme als eine Technologie dar, die die Filterkiesschüttung intensiv zu spülen vermag und damit einen sehr hohen Austrag von Feinkorn oder feinkörnigen Produkten erzielt.

Die Begrenzung des effektiven Wirkungsbereiches der Intensiventnahmen auf die Filterkiesschüttung sollte mit diesen Darstellungen deutlich geworden sein.

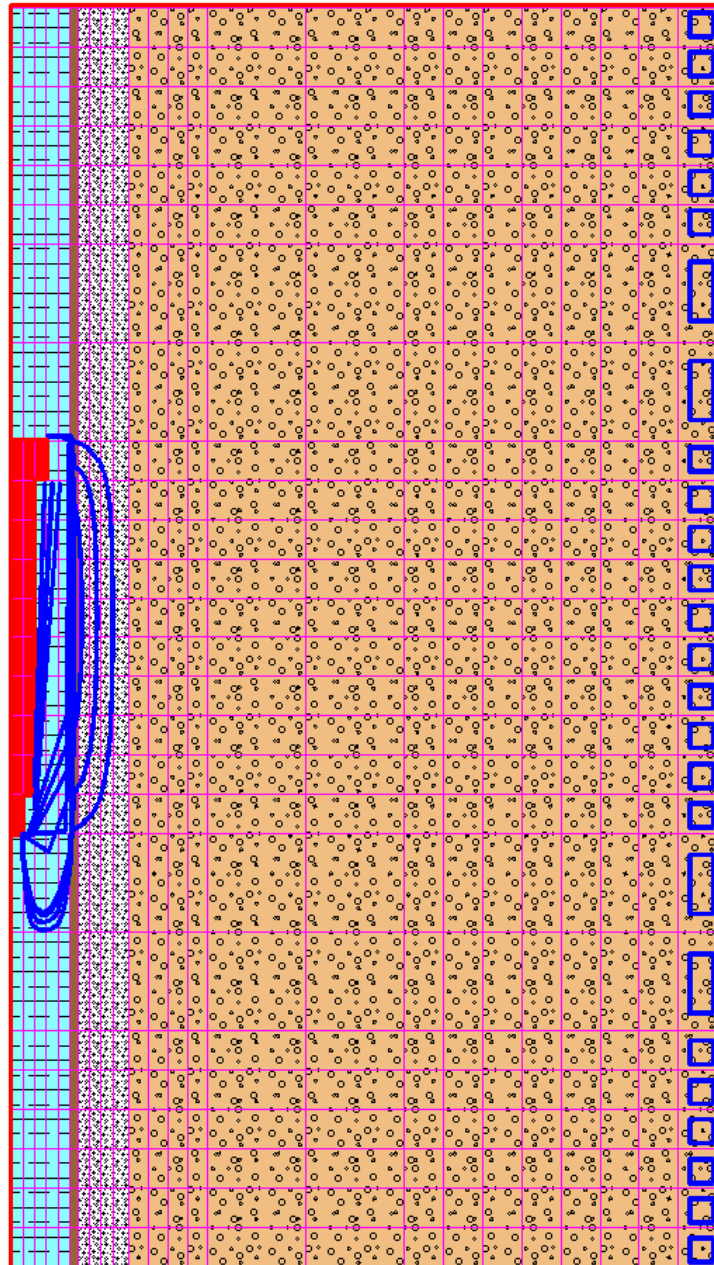
Simuliert man den Strömungsprozess der Intensiventnahmen für einen Brunnen mit einer zweifachen Schüttung, die gemäß dem geltenden Regelwerk mit dem Filterfaktor 5 abgestuft sein soll und damit einen Durchlässigkeitsunterschied von einer Zehnerpotenz besitzt, so unterstreicht das erzielte Strömungsbild, wie es in **Abbildung 6.3** dargestellt ist, dass sich der Spüleffekt der Intensiventnahme stets auf die Filterkiesschicht bezieht, die am Filterrohr anliegt. Die äußere Schüttung entzieht sich damit der Spülung und wird folglich von dem Behandlungs-/Regenerierprozess ausgeschlossen.



**Abb. 6-3:** Strömlinienverlauf bei der Intensiventnahme aus einem Vertikalfilterbrunnen mit einer zweifachen Schüttung

### 6.3 Spülkopf

Bei Vertikalfilterbrunnen mit einer einfachen Filterkiesschüttung und einer Spülgarnitur ohne Dichtelement (wie z. B. in der Testanlage VA 2 eingesetzt) ergibt sich in einem realen Brunnen ein Strömungsbild, wie es in der **Abbildung 6-4** dargestellt ist.

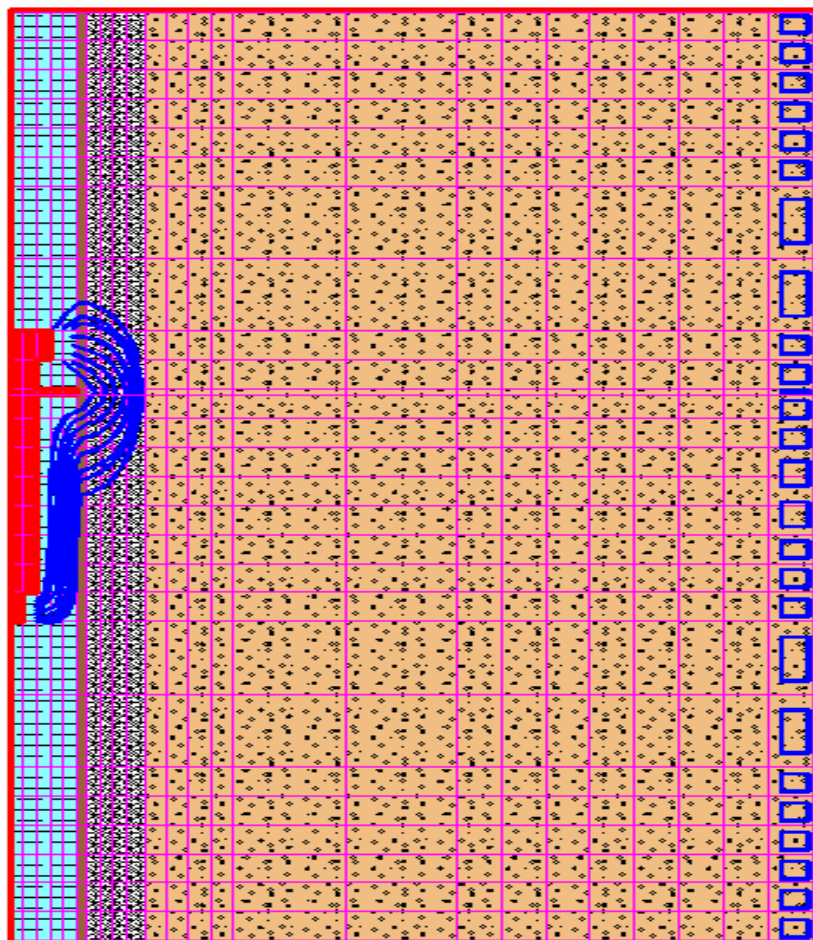


**Abb. 6-4:** Strömungsfeld der Niederdruckwasserspülung bei Brunnen mit einer einfachen Filterkiesschüttung



Die Simulation der Strömungsprozesse zeigt, dass zwischen Spülkopf und Pumpe, d. h. so wie die Technik in der Praxis bis heute vorzugsweise eingesetzt wird, ein innerer Kreislauf entsteht, der im Sinne der Regenerieraufgabe als Verlust quitiert werden muss. Die Größe des unproduktiven Kreislaufes ist stark vom Abstand der Düsen vom Filter abhängig. Die in Abb. 6-4 dargestellten Fließwege demonstrieren die Verhältnisse, wie sie in der Praxis anzutreffen sind.

In **Abbildung 6-5** ist dargestellt, wie die Spülwirkung des Spülkopfes im Filterkiesbereich entscheidend verstärkt werden kann, wenn zwischen Spülkopf und Pumpe ein Dichtelement eingesetzt wird.



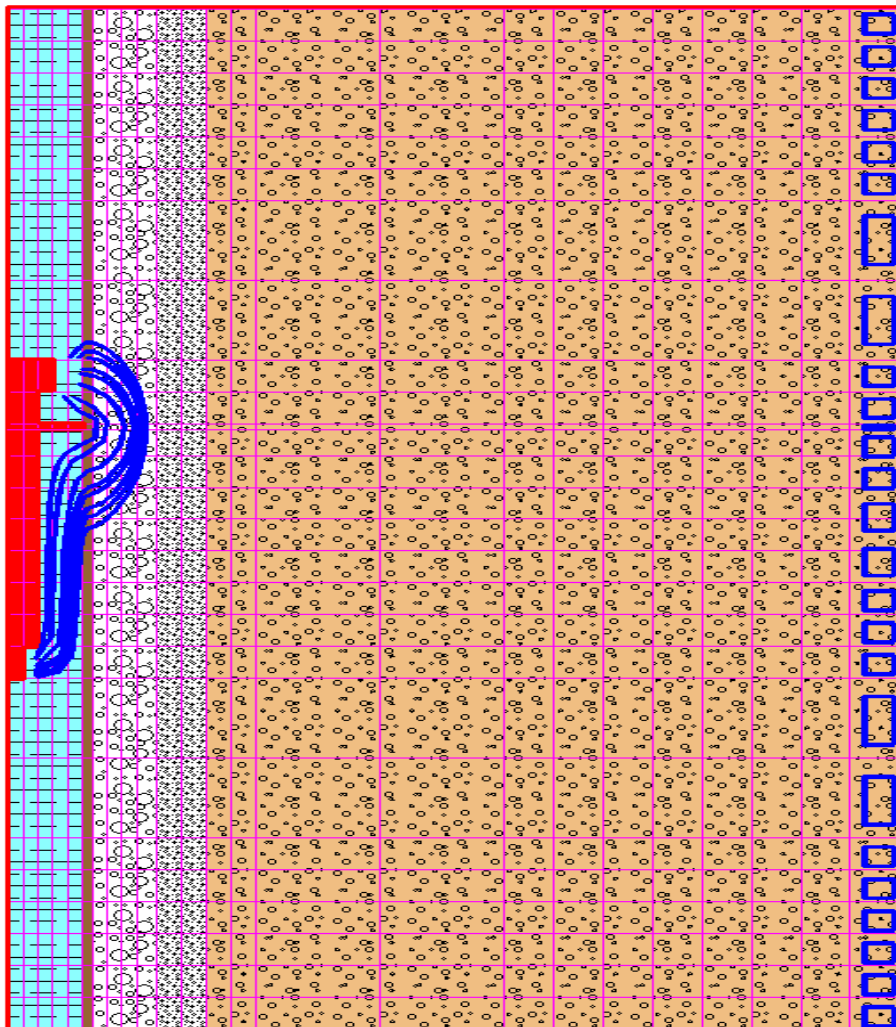
**Abb. 6-5:** Strömungsfeld der Niederdruckwasserspülung mit abgepacktem Spülkopf bei Vertikalfilterbrunnen mit einfacher Filterkiesschüttung

Unter derartiger Bedingung wird der gesamte Spülstrom durch die Filterkiesschüttung gelenkt und damit eine maximale Vertikalströmung erreicht.

Mit dieser intensiven Vertikalströmung kann ein effektiver Feinkornaustrag aus der Filterkiesschicht erreicht werden.

Infolge der großen Durchlässigkeitsunterschiede zwischen Filterkies und anstehenden Bodenformationen ist eine Ausdehnung des Spülprozesses auf die anstehenden Bodenformationen nicht möglich.

Analog der Intensiventnahme beschränken sich die Strombahnen auch bei der Niederdruckwasserspülung im Falle der Existenz einer zweiten Schüttung im Wesentlichen auf die Zone, die an dem Filterrohr anliegt. Die **Abbildung 6-6** veranschaulicht diese Bewertung.



**Abb. 6-6:** Strömungsfeld der Niederdruckwasserspülung bei abgepacktem Spülkopf unter den Bedingungen einer zweifachen Filterkiesschicht

## 6.4 Doppelrotationsaggregat

Die Simulation der beim Doppelrotationsaggregat auftretenden Strömungsprozesse sollte den Widerspruch zwischen den Ergebnissen der Tests in den Versuchsanlagen, wobei dem Gerät die Erzeugung von Strömungsprozessen in der Kiesschüttung nicht gelang, und den Praxiserfahrungen, wobei das Doppelrotationsaggregat einen beachtenswert hohen Austrag an Sand und abgetrennten Materialien erreicht, durch die Simulationen der Strömungsprozesse, wie sie unter realen Bedingungen auftreten, klären.

Für die Simulation galten folgende Randbedingungen:

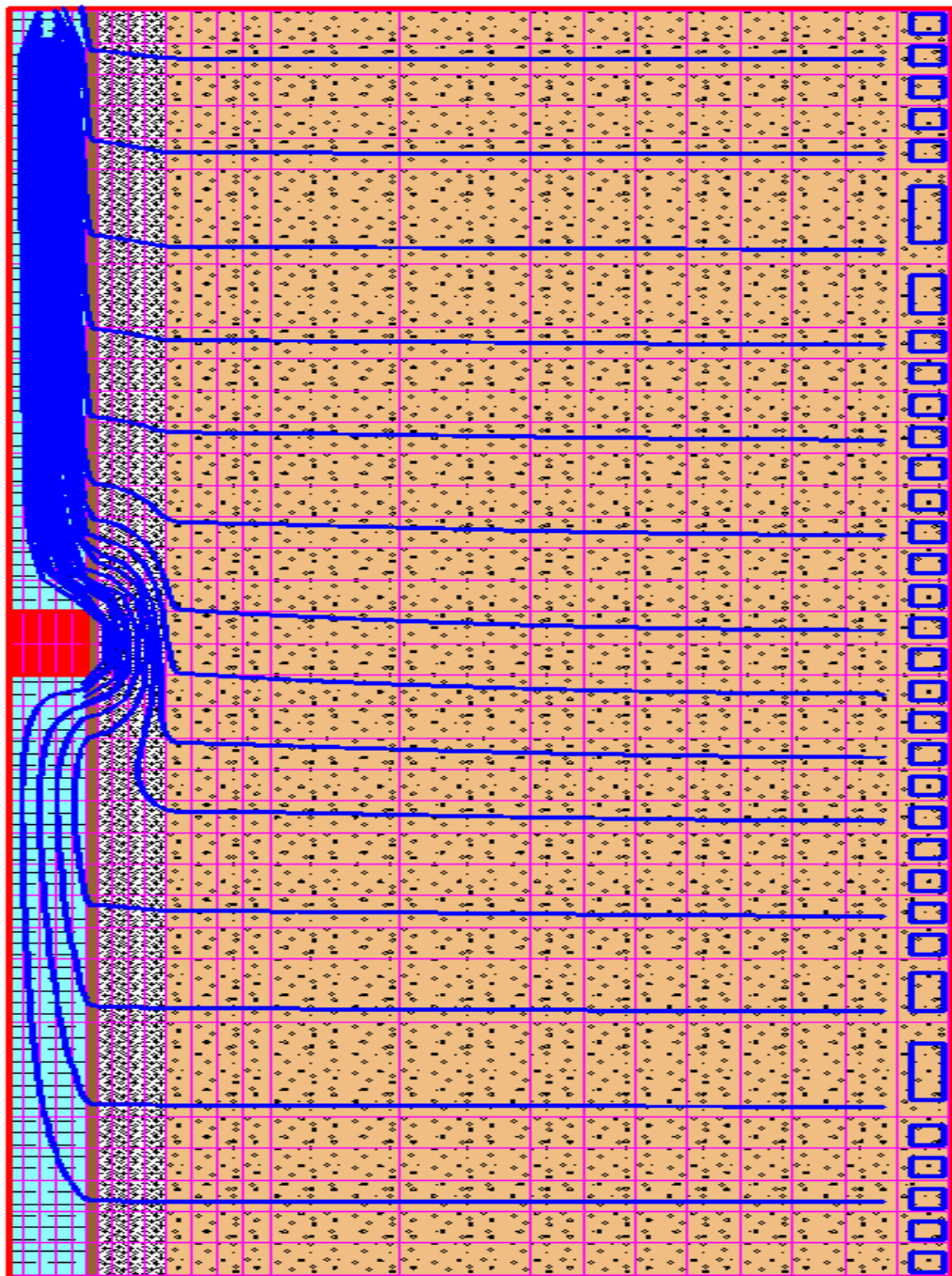
- dort, wo das Doppelrotationsaggregat die Wasserdampfblase aufbaut, ist ein vertikaler Wassertransport im Filterrohr ausgeschlossen,
- der Druck der Wasserdampfblase entwickelt sich nach allen Seiten gleichmäßig,
- die Wasserentnahme aus dem Brunnen erfolgt über eine Unterwasserpumpe unterhalb des Wasserspiegels.

In **Abbildung 6-7** ist das Ergebnis der Simulation dargestellt. Danach wird der Brunnen, wie bei vielen anderen Technologien, die mit einer Wasserentnahme gekoppelt sind, relativ gleichmäßig angeströmt. Das Grundwasser tritt relativ gleichmäßig in die Filterkiesschicht ein und von da aus in das Filterrohr.

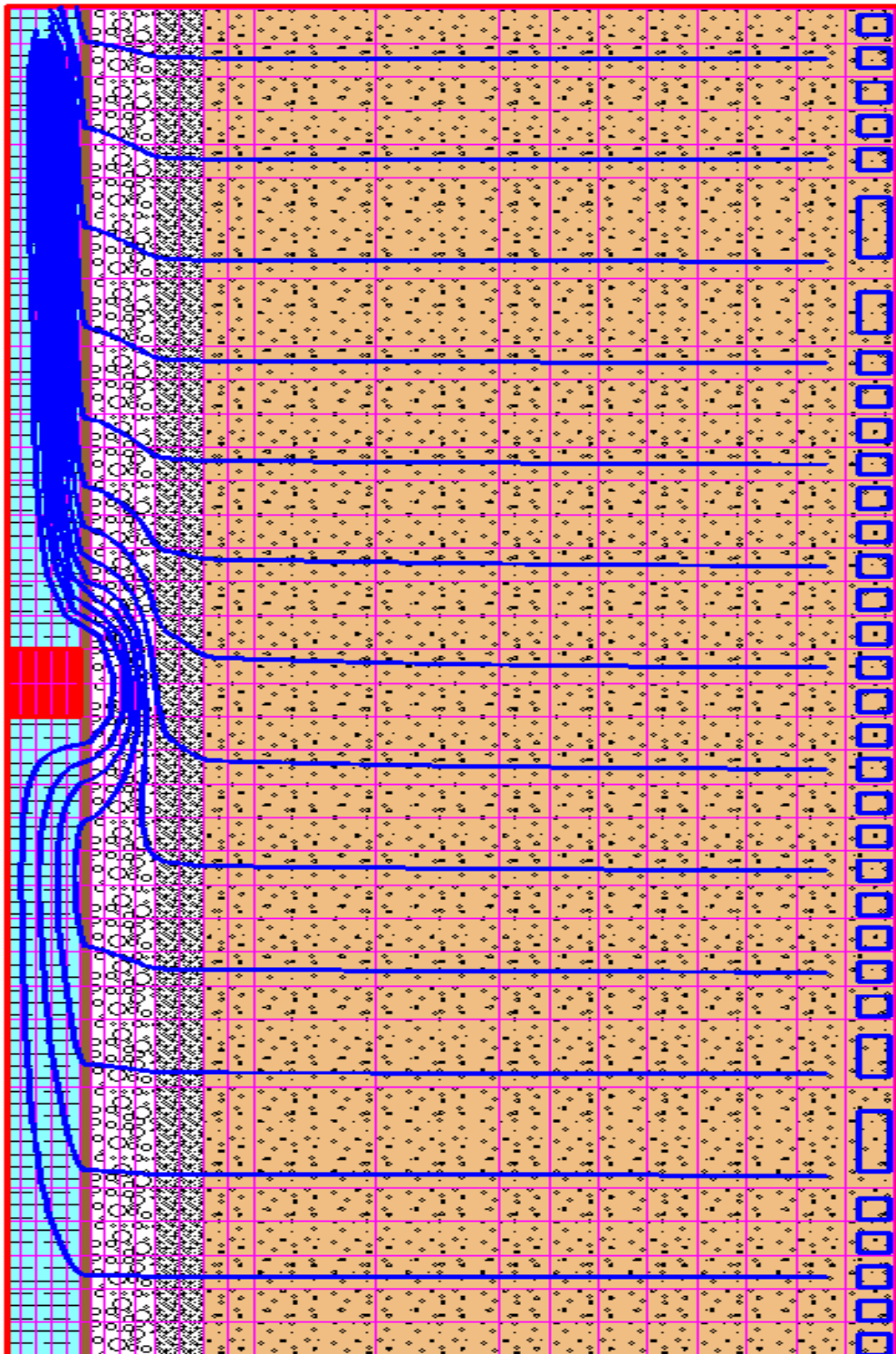
Da die Wasserdampfblase den aufsteigenden Wasserstrom den Weg am Doppelrotationsaggregat vorbei nicht gewährt, umgeht der Wasserstrom die blockierte Zone, indem er den Weg über den Filterkies wählt. Bei dieser Umspülung tritt infolge des Potentialunterschiedes und der kurzen Wege eine intensive Spülung der Filterkieszone in Höhe der Arbeitsebene des Doppelrotationsaggregates auf, die den hohen Austragungseffekt des Doppelrotationsaggregates erklärt. Nach dieser Theorie ist der Austragungseffekt in den oberen Bereichen des Filterkiesrohres stärker als in den unteren Abschnitten.

Bei der Simulation der Strömungsprozesse unter den Bedingungen eines Vertikalfilterbrunnens mit einer zweifachen Kiesschüttung offenbart sich wieder, dass sich die Strömungsprozesse wie bei der Intensiventnahme ausschließlich auf die innere Schüttung konzentrieren. Die **Abbildung 6-8** veranschaulicht diese Ergebnisse.

Nach diesen Ergebnissen vermag auch das Doppelrotationsaggregat nicht die äußere Filterkiesschüttung zu behandeln.



**Abb. 6-7:** Strömungsfeld des Doppelrotationsaggregates beim Einsatz in Vertikalfilterbrunnen mit einfacher Filterkiesschüttung

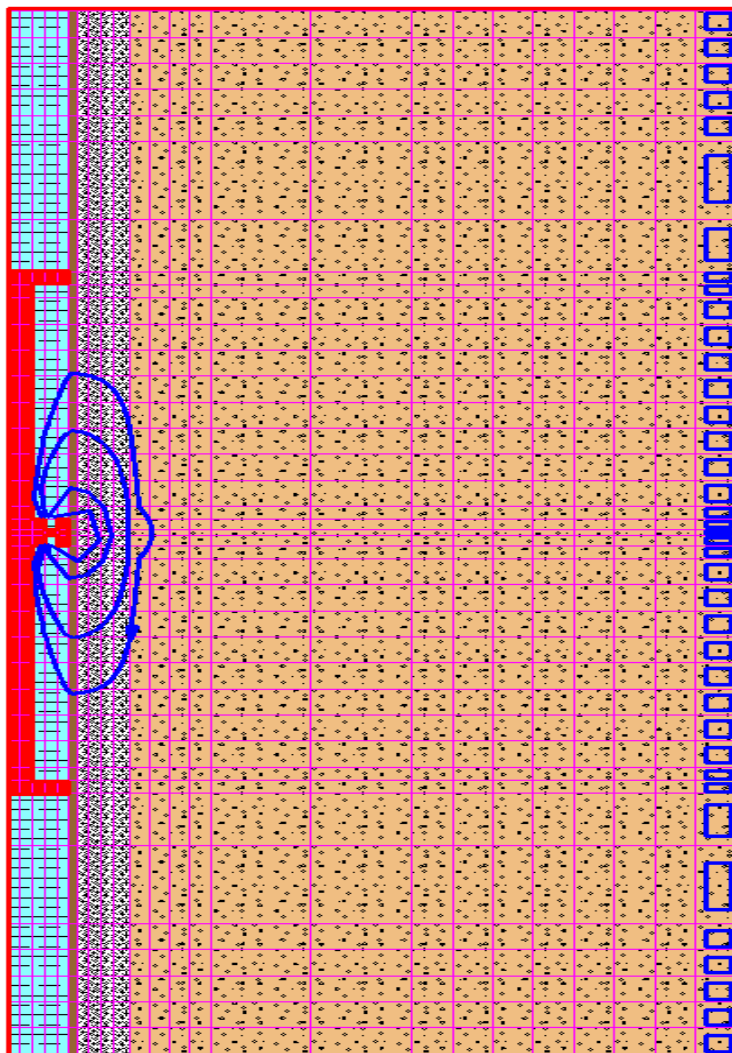


**Abb. 6-8:** Strömungsfeld des Doppelrotationsaggregates beim Einsatz in Vertikalfilterbrunnen mit zweifacher Filterkiesschüttung

## 6.5 Mehrkammergeräte

Basis der Nachweise sind die Modellansätze M2 und M3.

Bei Vertikalfilterbrunnen mit einer einfachen Filterkiesschüttung ergab sich ein Strömungsbild, wie es in der **Abbildung 6-9** dargestellt ist. Da bei den Mehrkammergeräten nur ein interner Wasserkreislauf gefahren wird, genügt die Darstellung im brunnennahen Raum.

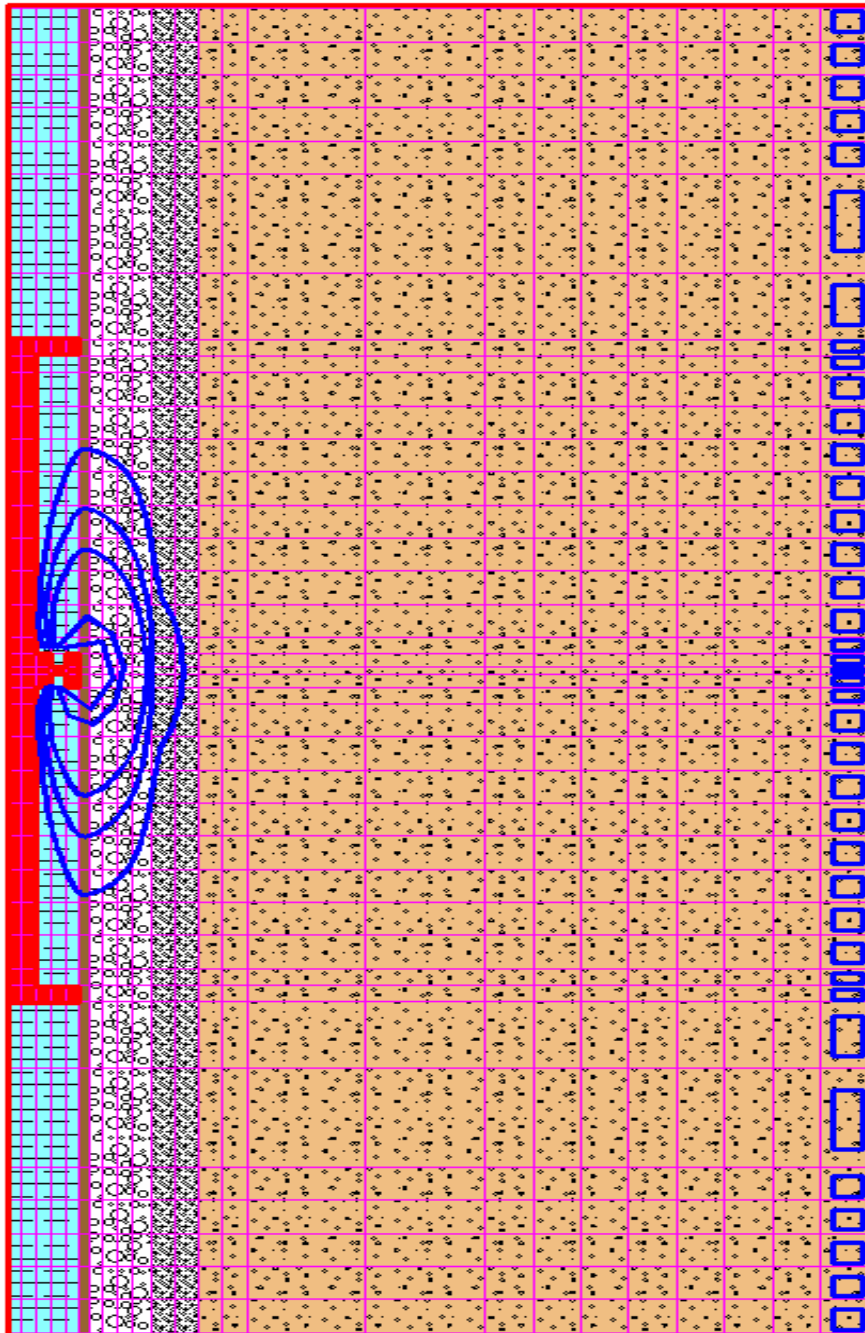


**Abb. 6-9:** Darstellung der Fließwege bei der Behandlung mit Mehrkammergeräten bei Vertikalfilterbrunnen mit einfacher Filterkiesschüttung

Die Ergebnisse der mathematischen Modellierung belegen, dass die Mehrkammergeräte durch die Schaffung großer Austrittsflächen (mit konstantem Überdruck) und großen Eintrittsflächen (mit konstantem Unterdruck) die einzigen Geräte sind, denen es gelingt, einen Strömungsprozess in dem Umfeld eines

Brunnens mit einfacher Filterkiesschüttung bzw. mit zweifacher Filterkiesschüttung zu generieren.

Die **Abbildung 6-10** veranschaulicht diese Theorie bildlich durch die Darstellung des Strömungsfeldes.



**Abb. 6-10:** Darstellung des Strömungsfeldes bei der Behandlung mit dem Mehrkammergerät bei Vertikalfilterbrunnen mit mehrfacher Kiesschüttung








## 7 Zusammenfassung

### 7.1 Druckwellenvergleich

#### 7.1.1 Frequenzen

Die **Tabelle 7-1** stellt die gemessenen Hauptfrequenzen, wie sie die einzelnen Geräte in der Versuchsanlage VA 1 erreichten, nebeneinander.

**Tab- 7-1:** Darstellung der gemessenen Hauptfrequenzen der Regenerierverfahren

TECHNOLOGIE gem. W 130		GERÄT	DRUCKWELLENFREQUENZ in Hz	
HAUPTGRUPPE	UNTERGRUPPE	FIRMA	MESSWERT	GRAPHISCHER VERGLEICH
HOCHDRUCKSPÜL- VERFAHREN	KEINE	WELLJET (AQUAPlus)	500	
		HRH - GERÄT (ABS)	500	
DRUCKWELLEN- / IMPULS- VERFAHREN	WASSERHOCHDRUCK	DOPPELRÖT, AGG. (E+M)	500	
	KNALLGAS	PULSATOR (PST)	100	
	LUFTKOMPRIMIERUNG	IMPULSGENERATOR (pigadi)	200	
		WellReg- Plus- Gerät (AQUAPlus)	100	
	WASSERKOMPRIMIERUNG	—		
	SPRENGLADUNGEN	—		
	ULTRASCHALL	SONICSONDE		20000
ERDMANNSONDE			25000	

Nach diesen Ergebnissen ließen sich die druckwellengenerierenden Geräte in 3 Gruppen gliedern:

1. Hochfrequente Druckwellenerzeuger - vertreten durch die Ultraschalltechnik.
2. Mittelfrequente Druckwellenerzeuger - vertreten durch die Wasserhochdruckspülgeräte und die Doppelrotationsaggregate.



3. Niederfrequente Druckwellenerzeuger - vertreten durch die Pulsatorgeräte und die Impulsgeneratoren.

Bei den niederfrequenten Druckwellen wurde bei der Frequenzauswertung festgestellt, dass auf den Hauptfrequenzen Nebenfrequenzen aufgelagert sind, die dem Ultraschall relativ nahe kommen. Bei den mittelfrequenten Druckwellen konnte dieser Nachweis mit der verfügbaren Messtechnik nicht erbracht werden.

Die Verfolgung der Frequenzen bei der Ausbreitung aus den Brunnen in das Umfeld, zeigt, dass die Frequenzwerte gemäß den physikalischen Gesetzen konstant bleiben.

Welchen Einfluss die Frequenz auf den eigentlichen Trennprozess hat, konnte und sollte unter den Bedingungen dieser F/E-Aufgabe (unbelastetes Material) nicht geklärt werden.

### 7.1.2 Beschleunigung

Die **Tabelle 7-2** stellt die Messungen der Beschleunigungswerte, wie sie einzelne Geräte im Filterkies (4 cm hinter Filterrohr) zu erzeugen vermochte, nebeneinander.

Im Gegensatz zur Frequenzspreizung liegen diese Messergebnisse dichter zusammen. Trotzdem bietet sich auch hier noch eine Gruppeneinteilung an, wobei

- die hochbeschleunigenden Druckwellenerzeuger, vertreten durch die Impulsgeneratoren, die Ultraschallsonden und die Doppelrotationsaggregate,
- sich von den niederbeschleunigenden Druckwellenerzeugern, vertreten durch die Hochdruckspülgeräte und die Pulsgeräte,

unterscheiden.

Erwartungsgemäß registrierten die Messungen, dass die Beschleunigungswerte mit zunehmender Entfernung vom Brunnen abnehmen. (siehe **Tabelle 7-3**)

**Tab. 7-2:** Darstellung der gemessenen Beschleunigungen, die die Geräte im zentralen Bereich der Filterkiesschüttungen erreichen

TECHNOLOGIE gem. W 130		GERÄT	MITTLERE BESCHLEUNIGUNG IN DER FILTERKIESSCHICHT in m/s <sup>2</sup>	
HAUPTGRUPPE	UNTERGRUPPE	FIRMA	MESSWERT	GRAPHISCHER VERGLEICH
HOCHDRUCKSPÜL- VERFAHREN	KEINE	WELLJET (AQUAPlus)	63	
		HRH - GERÄT (ABS)	66	
DRUCKWELLEN- / IMPULS- VERFAHREN	WASSERHOCHDRUCK	DOPPELROT. AGG. (E+M)	303	
	KNALLGAS	PULSATOR (PST)	68	
	LUFTKOMPRIMIERUNG	IMPULSGENERATOR (pigadi)	971	
		WellReg- Plus- Gerät (AQUAPlus)	39	
	WASSERKOMPRIMIERUNG	—		
	SPRENGLADUNGEN	—		
	ULTRASCHALL	SONICSONDE	340	
ERDMASSIVSONDE		485		

**Tab. 7-3:** Darstellung der gemessenen Beschleunigungen, die die Geräte 100 mm nach der Übergangszone in die anstehende Bodenformation noch besitzen

TECHNOLOGIE gem. W 130		GERÄT	MITTLERE BESCHLEUNIGUNG IN DER BODENFORMATION in m/s <sup>2</sup>	
HAUPTGRUPPE	UNTERGRUPPE	FIRMA	MESSWERT	GRAPHISCHER VERGLEICH
HOCHDRUCKSPÜL- VERFAHREN	KEINE	WELLJET (AQUAPlus)	12	
		HRH - GERÄT (ABS)	18	
DRUCKWELLEN- / IMPULS- VERFAHREN	WASSERHOCHDRUCK	DOPPELROT. AGG. (E+M)	49	
	KNALLGAS	PULSATOR (PST)	24	
	LUFTKOMPRIMIERUNG	IMPULSGENERATOR (pigadi)	65	
		WellReg- Plus- Gerät (AQUAPlus)	27	
	WASSERKOMPRIMIERUNG	—		
	SPRENGLADUNGEN	—		
	ULTRASCHALL	SONICSONDE	2	
ERDMASSIVSONDE		0		

Tabelle 7-3 veranschaulicht die Messwerte, wie sie 10 cm hinter der Schichtgrenze Filterkies/Boden, also in der anstehenden Bodenformation, auftreten.

Auffallend, aber andererseits in Übereinstimmung mit den Gesetzen der Petrophysik, ist die begrenzte Dämpfung der Druckwellen der mittel- und niederfrequenten Druckwellenerzeuger, so dass diesen Geräten eine Wirkung in der angrenzenden Bodenformation zugesprochen werden kann.

Dem gegenüber erfahren die Beschleunigungswerte hochfrequenter Druckwellen an der Schichtgrenze Filterkies/anstehende Bodenformation eine deutliche Dämpfung, so dass daraus abgeleitet werden kann, dass die hochfrequent arbeitenden Geräte ihren Beschleunigungseinfluss auf die Filterkiesschüttung konzentrieren.

### 7.1.3 Wegamplitude

Die Wegamplitude der Druckwellen an den Messpunkten (vgl. Abb. 3-5) sollte im Vergleich mit den Porenkanälen des zu durchlaufenden Materials gesehen werden. Die Dämpfung bzw. die Reflexion der Druckwellen wird demnach in der Filterkiesschüttung geringer erwartet als sie in der anstehenden Bodenformation auftreten wird. Aus größeren Wegamplituden werden bei ähnlicher Frequenz stärkere Impulse auf das zu bewegende Korn prognostiziert.

**Tabelle 7-4** veranschaulicht die Wegamplitude, wie sie für die getesteten Geräte in der Filterkiesschüttung gemessen werden. **Tabelle 7-5** stellt die Werte gegenüber, die die Geräte in der anstehenden Bodenformation erreichten.

**Tab. 7-4:** Wegamplituden der Geräte im Filterkiesbereich




TECHNOLOGIE gem. W 130		GERÄT	MAX. WEGAMPLITUDE IN DER FILTERKIESSCHICHT in m	
HAUPTGRUPPE	UNTERGRUPPE	FIRMA	MESSWERT	GRAPHISCHER VERGLEICH
HOCHDRUCKSPÜL- VERFAHREN	KEINE	WELLJET (AQUAPlus)	6*10e-6	
		HRH - GERÄT (ABS)	7*10e-6	
DRUCKWELLEN- / IMPULS- VERFAHREN	WASSERHOCHDRUCK	DOPPELRÖT. AGG. (E+M)	3*10e-5	■
	KNALLGAS	PULSATOR (PST)	2*10e-4	■
	LUFTKOMPRIMIERUNG	IMPULSGENERATOR (pigadi)	6*10e-4	■
		WellReg- Plus- Gerät (AQUAPlus)	1*10e-4	■
	WASSERKOMPRIMIERUNG	—		
	SPRENGLADUNGEN	—		
	ULTRASCHALL	SONICSONDE		2*10e-8
ERDMANNSONDE			2*10e-8	

Die Geräte unterscheiden sich im Hinblick auf die maximalen Wegamplituden deutlich. Danach sollten die Geräte in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Gruppe A - vertreten durch die mittel- und niedrigfrequenten Geräte, die mit hoher Wahrscheinlichkeit Strukturänderungsprozesse in der Filterkiesschicht in Form von Verdichtungen erwarten lassen.

Gruppe B - vertreten durch die Ultraschallgeräte, die die Struktur der Filterkiesschicht sicher nicht ändern und damit keine Setzungen generieren.

**Tab. 7-5:** Wegamplituden der Geräte in der anstehenden Bodenformation

TECHNOLOGIE gem. W 130		GERÄT	MAX. WEGAMPLITUDE IN DER BODENFORMATION in m	
HAUPTGRUPPE	UNTERGRUPPE		MESSWERT	GRAPHISCHER VERGLEICH
HOCHDRUCKSPÜL- VERFAHREN	KEINE	WELLJET (AQUAPlus)	1*10e-6	
		HRH - GERÄT (ABS)	3*10e-6	
DRUCKWELLEN- / IMPULS- VERFAHREN	WASSERHOCHDRUCK	DOPPELRÖT. AGG. (E+M)	5*10e-6	
	KNALLGAS	PULSATOR (PST)	6*10e-5	
	LUFTKOMPRIMIERUNG	IMPULSGENERATOR (pigadi)	3*10e-4	
		WeilReg- Plus- Gerät (AQUAPlus)	7*10e-5	
	WASSERKOMPRIMIERUNG	—		
	SPRENGLADUNGEN	—		
	ULTRASCHALL	SONICSONDE		1*10e-10
ERDMANN-SONDE			2*10e-12	

#### 7.1.4 Spezifischer Energieeintrag

Bei der Druckwellenerzeugung wird die vom Equipment aufgebrauchte oder eingesetzte Energie nicht in jedem Fall in voller Größe zur Druckwellenumsetzung genutzt. So nutzt z. B. das Doppelrotationsaggregat einen Großteil der eingesetzten Energie zur Erzeugung des Dampftraumes, der letztlich den Austragsprozess im Behandlungsabschnitt so außerordentlich effektiv unterstützt.

Für die Bewertung der durch die Druckwellen in die Filterkiesschicht und in die angrenzende Bodenformation eingetragene Energie wurden die Werte aus den Messergebnissen der Messsonde der Filterkiesschicht und der angrenzenden Bodenformation abgeleitet. **Tabelle 7-6** veranschaulicht diese Parameter für die Filterkiesbereiche. **Tabelle 7-7** zeigt das Bild in der angrenzenden Bodenformation.

**Tab. 7-6:** Energieeintrag der Geräte im Bereich der Filterkieszonen

TECHNOLOGIE gem. W 130		GERÄT	MITTLERE SPEZ. ENERGIEEINTRAG IN DER FILTERKIESCHICHT in Nm	
HAUPTGRUPPE	UNTERGRUPPE		MESSWERT	GRAPHISCHER VERGLEICH
HOCHDRUCKSPÜL- VERFAHREN	KEINE	WELLJET (AQUAPlus)	2*10e -4	
		HRH - GERÄT (ABS)	2*10e -4	
DRUCKWELLEN- / IMPULS- VERFAHREN	WASSERHOCHDRUCK	DOPPELROT. AGG. (E+M)	5*10e -3	
	KNALLGAS	PULSATOR (PST)	6*10e -3	
	LUFTKOMPRIMIERUNG	IMPULSGENERATOR (pigad)	3*10e -1	█
		WellReg- Plus- Gerät (AQUAPlus)	2*10e -3	
	WASSERKOMPRIMIERUNG	—		
	SPRENGLADUNGEN	—		
	ULTRASCHALL	SONICSONDE	4*10e -6	
ERDWINSONDE		5*10e -6		

**Tab. 7-7:** Energieeintrag der Geräte, gemessen/berechnet für einen Punkt, 10 cm hinter der Grenzfläche Filterkies anstehende Bodenformation

TECHNOLOGIE gem. W 130		GERÄT	MITTLERE SPEZ. ENERGIEEINTRAG IN DER BODENFORMATION in Nm	
HAUPTGRUPPE	UNTERGRUPPE		MESSWERT	GRAPHISCHER VERGLEICH
HOCHDRUCKSPÜL- VERFAHREN	KEINE	WELLJET (AQUAPlus)	6*10e -6	
		HRH - GERÄT (ABS)	2*10e -5	
DRUCKWELLEN- / IMPULS- VERFAHREN	WASSERHOCHDRUCK	DOPPELROT. AGG. (E+M)	1*10e -4	
	KNALLGAS	PULSATOR (PST)	7*10e -4	
	LUFTKOMPRIMIERUNG	IMPULSGENERATOR (pigad)	7*10e -2	█
		WellReg- Plus- Gerät (AQUAPlus)	9*10e -4	
	WASSERKOMPRIMIERUNG	—		
	SPRENGLADUNGEN	—		
	ULTRASCHALL	SONICSONDE	1*10e -10	
ERDWINSONDE		8*10e -14		

Gruppiert man die Geräte nach diesen Parametern, so hebt sich der Impulsgenerator deutlich von allen anderen Geräten ab. Das gilt für den Filterkiesbereich, wie für die anstehende Bodenformation.

Darüber hinaus zeigt sich, dass in der Filterkiesschicht der Energieeintrag der Einzelpulser, bezogen auf den Einzelimpuls, größer ist als der Energieeintrag der Dauerpulser ist.

## 7.2 Strömungsfeldvergleich

Fasst man die Ergebnisse der physikalischen Modellversuche und die Simulationen der mathematischen Modelle zusammen, so kann man folgende Schlussfolgerung ziehen:

- Filterkies und anstehende Bodenformation besitzen im Regelfall einen so großen Durchlässigkeitsunterschied, dass sich die Waschprozesse, die von Regeneriergeräten der mechanischen Verfahren initiiert werden, immer auf die Filterkiesschicht konzentrieren. Dabei erfassen die Strömungsfelder bei jeder getesteten Technik, wenn diese im Filterkiesbereich turbulente Strömungen erzeugt, die **gesamte Schichtstärke**.
- Bei einer zweiten Filterkiesschicht vollziehen sich die durch die Regenerierungen ausgelösten Strömungsprozesse (wenn die Filterkornabstufung regelrecht vorgenommen ist) auch **nur in der inneren**, am Filterrohr anliegenden **Schüttung**.
- Die Wirksamkeit der Regeneriergeräte, die auf Waschprozesse außerhalb des Filterrohres, d. h. im Filterkies orientieren (Intensiventnahmen, Niederdruckwasserspülung), ist proportional von der **Größe des gewählten Wasserstromes** abhängig.
- Im Gegensatz zu den Waschprozess auslösenden Geräten vermag das Mehrkammergerät bei der Spülung die Kontaktzone 2 zu überwinden.

## 7.3 Gerätebewertung

### 7.3.1 Seiher

In der F/E-Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass die Erwartung des Merkblattes W 130, dass diese Geräte der Intensiventnahmetechnik ihre Wirkung bis in die anstehende Bodenformation ausdehnen können, nicht erfüllt werden kann. Die Gerätetechnik, gleich, ob es sich um Seiher oder abgepackte Unterwasserpumpen handelt, vermag nur die Filterschlitze und die

Filterkiesschicht zu waschen. Der Waschprozess bezieht sich dabei auf die gesamte Schichtstärke und erreicht eine sehr hohe Effizienz.

Da die aktiven Behandlungszonen der Technik immer in Höhe der Packer auftreten, sollte die Arbeitsweise der Geräte durch Anpassung der Umsetztechnologie geräteorientiert optimiert werden.

### **7.3.2 Spülköpfe**

In der F/E-Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass die Erwartung des Merkblattes W 130, dass diese Geräte der Niederdruckwasserspülung ihre Wirkung bis in die anstehende Bodenformation ausdehnen können, nicht erfüllt werden kann. Die Gerätetechnik vermag, noch dazu wenn der Spülkopf gegen die Betriebspumpe abgedichtet wird, die Filterkiesschicht mit hoher Effektivität zu waschen und dabei mit Sicherheit die gesamte Schüttungsstärke zu erfassen.

Da die aktiven Behandlungszonen der Technik immer in Höhe der Packer auftreten, sollte die Arbeitsweise der Geräte durch Anpassung der Umsetztechnologie geräteorientiert optimiert werden.

### **7.3.3 Spülaggregate**

In der F/E-Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass die Geräte der Hochdruckspültechnik (bei der Innenspülung) in den Arbeitsbereichen Wirkungen besitzen, wie sie im Merkblatt W 130 genannt sind.

Im Gegensatz zum bisherigen Kenntnisstand konnte im Rahmen der F/E-Arbeit nachgewiesen werden, dass die Trenneffekte dieser Geräte in der Filterkiesschicht nur zu einem unbedeutenden Teil durch Wascheffekte als vielmehr durch die Erzeugung von Schwingungen erzielt werden. Die mittelfrequenten Schwingungen vermögen im Arbeitsbereich strukturbeeinflussend zu arbeiten und dabei die bekannten Trenneffekte auszulösen.

### **7.3.4 Doppelrotationsaggregat**

Das Gerät der Druckwellen-/Impulstechnik, das auf Wasserhochdruckbasis arbeitet, wirkt als Trenngerät, in dem es Schwingungen zu erzeugen vermag, die das Strukturgefüge und die Lagerungsdichte des Filterkieses mit Sicherheit und der anstehenden Bodenformation mit hoher Wahrscheinlichkeit beeinflussen. In der F/E-Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass das Gerät diese Funktionen bis zu mehreren Dezimeter in die anstehende Bodenformation messbar erreicht. Der



im Merkblatt genannte Arbeitsbereich ist, wenn man die Wirkung auf den Trennungsprozess bezieht, richtig.

Die Austragung der getrennten Produkte erfolgt nach den Aussagen der F/E-Arbeit mit starker Unterstützung des Doppelrotationsaggregates vorwiegend in der Filterkieszone. In der anstehenden Bodenformation kann getrenntes Material nur in dem Maße ausgetragen werden, wie der Austragungsprozess von der Brunnenanströmung organisiert wird.

### **7.3.5 Pulsator**

Das Gerät des Druckwellenverfahrens (Knallgasbasis) arbeitet als Trenngerät, in dem es Schwingungen zu erzeugen vermag, die das Strukturgefüge und die Lagerungsdichte des Filterkieses und der anstehenden Bodenformation mit hoher Wahrscheinlichkeit beeinflussen. In der F/E-Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass das Gerät diese Funktionen bis zu mehrere Dezimeter in die anstehende Bodenformation messbar erreicht. Der im Merkblatt genannte Arbeitsbereich ist, wenn man die Wirkung auf den Trennungsprozess bezieht, richtig.

### **7.3.6 Impulsgeneratoren**

Die Geräte des Druckwellenverfahrens (Gaskomprimierung) arbeiten als Trenngeräte, in dem sie Schwingungen erzeugen, die das Strukturgefüge und die Lagerungsdichte des Filterkieses und der anstehenden Bodenformation mit Sicherheit tief beeinflussen. In der F/E-Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass die Geräte diese Funktionen bis zu mehrere Dezimeter in die anstehende Bodenformation messbar erreichen. Der im Merkblatt genannte Arbeitsbereich ist, wenn man die Wirkung auf den Trennungsprozess bezieht, richtig.

Der Austrag des getrennten Materials wird vom Pulsator nicht beeinflusst und gesondert organisiert.

### **7.3.7 US-Sonden**

Die Geräte des Druckwellenverfahrens (Ultraschalltechnik) arbeiten als Trenngeräte, indem sie Schwingungen erzeugen, die auf das Filterkorn und deren Beläge einwirken. Von der Art der Schwingungen ist ein Einfluss auf die Struktur des geschütteten Bereiches nicht zu erwarten (keine Setzungen).

Bei der F/E-Arbeit wurde nachgewiesen, dass die Druckwellen im gesamten Filterkiesbereich eindringen und damit der im Merkblatt ausgewiesene Wirkungsbereich bestätigt wird.

### **7.3.8 Mehrkammergeräte der chemischen Regenerierung**

Die Geräte haben den Spülprozess für den chemischen Regenerierungsprozess zu generieren. Im Rahmen der F/E-Arbeit wurde nachgewiesen, dass diese Geräte sowohl den Filterkiesbereich als auch die anstehende Bodenformation erfassen. Der im Merkblatt ausgewiesene Arbeitsbereich wird bestätigt.

## **7.4 Schlusssatz**

Im F/E-Bericht sind für ausgewählte Geräte der Regeneriertechnik Strömungsversuche, Druckwellenanalysen und mathematische Simulationen durchgeführt worden, um deren Eindringtiefe in der Kiesschüttung nachzuweisen.

Gemäß der Aufgabenstellung wurde unter der Wirksamkeit die Tiefe der erreichbaren Fließwege bzw. die Eindringtiefe der Wellen in das Umfeld gesehen.

Im Ergebnis der F/E-Arbeit konnte zunächst nachgewiesen werden, dass die Einschätzungen über die Arbeitsbereiche der getesteten Technik, wie sie im Merkblatt W 130 dargestellt sind, vom Grundsatz her richtig sind.

Gewisse Einschränkungen ergaben sich lediglich bei der Intensiventnahmetechnik und der Niederdruckwasserspültechnik, welchen eine Wirkung in der anstehenden Bodenformation abgesprochen werden musste.

Über die Grundsatzbestätigung zu den Arbeitsbereichen hinaus konnte mit den o. g. Tests nachgewiesen werden, dass einerseits die Stärke der Wirkung der einzelnen Geräte unterschiedlich groß ist und andererseits die Wirkung auf die oder in den anstehende Bodenformationen im Allgemeinen relativ klein ist und schnell gedämpft wird.

Durch die Arbeit können sowohl für die Brunnenbetreiber als auch für die Regenerierenden Geräte- und Verfahrensinformationen vertieft werden. Bei der Zusammenstellung von objektorientierenden Regeneriertechnologien sind die gewonnenen Erkenntnisse hilfreich.

Geht man davon aus, dass die mit den getesteten Geräten angestrebten Trennungsprozesse vorwiegend in der Filterkiesschicht erwünscht sind, wird die getestete Technik in der Regel den Anforderungen der Regenerierungsaufgabe in hohem Maße gerecht werden können.

## 8 Literaturverzeichnis

[ABS 2000]	Prospektmaterial der Aqua Brunnen Service GmbH
[AQUAPLUS]	Prospektmaterial der AQUAPLUS Brunnensanierung H. Mundig GmbH & Co. KG
[ATV AG 3]	ATV AG 3.1.6: Verfahren und Anwendungsgebiete der mechanischen Klärschlammdeintegration; <a href="http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de/ATV-AG3-1-6/Bericht1.pdf">http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de/ATV-AG3-1-6/Bericht1.pdf</a>
[BALKE et. al. 2000]	BALKE, K.D., U. BEIMS, F.W. HEERS, B. HÖLTING, R. HOMRIGHAUSEN, G. MATTHESS: Grundwassererschließung, Grundlagen - Brunnenbau - Grundwasserschutz - Wasserrecht, in: Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 4. Berlin – Stuttgart, 2000
[BUSCH et. al. 1993]	BUSCH, K.F., LUCKNER L., TIEMER K.: Geohydraulik 3. Aufl. Bornträger Berlin, 1993
[DVGW 2001]	DVGW Regelwerk: Brunnenregenerierung, DVGW- Merkblatt W 130, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn 2001
[E+M]	Prospektmaterial der E+M Bohr GmbH
[EICHHORN 1985]	EICHHORN, D.: Beitrag zur Theorie der Eisenelimination bei der Untergrundwasseraufbereitung, Dissertation A, 1985
[EICHHORN 1989]	EICHHORN, D.: Die „Wilschdorfer Konzeption“, Eine neue Variante der Brunnenregenerierung, bbr 11 (1989), S. 588-592
[ETSCHEL et. al. 2001]	ETSCHEL, C., SCHMIDT M.: Das Druckwellen- impulsverfahren für die Regenerierung und Entwicklung von Brunnen, bbr 4 (2001), S. 30-38
[GROSSMANN 2000]	GROSSMANN, J.: Regeneration von Trinkwasserbrunnen, Literaturstudie, gwf wasser abwasser 9 (2000), S. 586 - 593
[HOUBEN et. al.1999]	HOUBEN, G., MERTEN, S., TRESKATIS; C.: Entstehung, Aufbau und Alterung von Brunneninkrustationen, bbr 10 (1999), S. 29-35
[KINZELBACH 1995]	KINZELBACH, W.; RAUSCH R.: Grundwassermodellierung, Borntraeger Berlin, 1995

[KLOTZ 1975]	KLOTZ, D.: Hydraulische Eigenschaften handelsüblicher Brunnenfilterrohre, Zeitschr. dtsh. geolog. Gesell. 126 (1975)
[KUCHLING 1985]	KUCHLING, H.: Physik, Nachschlagewerk für Grundlagenfächer; Fachbuchverlag Leipzig; 1985
[MUNDIG et. al. 1998]	MUNDIG H., MUNZERT K., KREMER G.: Kontrollierte mechanisch-chemische Brunnenregenerierung, bbr 6 (1998)
[NIEHUES 1999]	NIEHUES, B.: DVGW-Umfrage Brunnenregenerierung, DVGW-FIGAWA-Intensivschulung Brunnenregenerierung, München 1999
[NOLTE et. al. 1991/99]	NOLTE, L.-P., RÜBESAMEN, U.: Pflege, Regenerierung, Sanierung und Rückbau von Brunnenanlagen. bbr 10/11 (1991), Überarbeitung 1999
[PAUL 1985]	PAUL, K. F.: Untersuchungen der Strömung in einem Versuchsstand mit Kiesschüttung zur Beurteilung der Wirksamkeit eines Brunnenreinigungsgerätes, Diplomarbeit, TU Berlin, 1985
[PAUL 2000]	PAUL, K.-F.: Brunnenregenerierung im Wandel der Zeit. Referat Tagung Brunnenbau 2000 (Wasser Berlin 2000), 24.10.2000
[PIGADI]	Prospektmaterial der pigadi GmbH
[PST]	Prospektmaterial der PST Spezialtiefbau GmbH
[PUHLMANN 2000]	PUHLMANN, D.: Brunnenalterung: Regenerieren oder Sanieren? bbr 8 (2000), S. 26-32
[SCHÖN 1983]	SCHÖN, J.: Petrophysik, Akademie-Verlag Berlin, 1983
[SONIC]	Prospektmaterial der Sonic Umwelttechnik GmbH
[STEUßLOFF et. al. 2001]	STEUßLOFF, S.; STEINBRECHER A.: Langzeiterfahrung mit Pulsverfahren, bbr 10 (2001)
[TRESKATIS et. al. 2000]	TRESKATIS, C., HOUBEN, G., PURONPÄÄ-SCHÄFER, P.: Regenerierung von Bohrbrunnen, wwt awt 6 (2000), S. 42-45
[WILKEN 2000]	WILKEN R.-D.: Zur Reinigung von Brunnen mit Ultraschall unter Druck, bbr 1 (2000), S. 32-36