

# **Injektion von Flüssigkeit in den Erdboden mit einem Hochdruckstrahl**

Bei der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Bernd Niemöller  
aus Visbek

Eingereicht am:	04.11.2009
Mündliche Prüfung am:	14.12.2009
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. H.-H. Harms
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. A. Kwade
Vorsitzender:	Prof. Dr. techn. R. Leithner



Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und  
Fluidtechnik

**Bernd Niemöller**

**Injektion von Flüssigkeit in den Erdboden  
mit einem Hochdruckstrahl**

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9027-6

ISSN 1616-1912

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms, dem Leiter des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Unter seiner Leitung durfte ich die Arbeiten zu dem von der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekt „Injektionsdüngung mit Hochdruck“ durchführen, deren Erkenntnisse die Basis der vorliegenden Dissertation bilden. Ihm möchte ich für das mir entgegen gebrachte Vertrauen, die großen Freiräume, die er mir während der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter eingeräumt hat, sowie letztendlich für die Möglichkeit zur Promotion danken. Seine fachliche und besonders seine moralische Unterstützung, die sich in seiner menschlich äußerst angenehmen und familiären Führungsform zeigt, waren mir insbesondere in schwierigen Zeiten eine große Hilfe.

Prof. Dr.-Ing. A. Kwade gilt für die Übernahme des Mitberichters sowie für seine wertvollen Anregungen und Hinweise ein großer Dank. Herrn Prof. Dr. techn. R. Leithner danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein ganz besonderer Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik. Durch die sehr gute und außerordentlich freundschaftliche Zusammenarbeit haben sie mich während meiner gesamten Institutszeit tatkräftig unterstützt. Dabei gebührt den wissenschaftlichen Mitarbeitern für die zahlreichen und gehaltvollen Gespräche und Diskussionen ebenso großer Dank wie allen Mitarbeitern aus Technik und Verwaltung, die durch ihre schnelle, unkomplizierte und mitdenkende Arbeitsweise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ebenfalls möchte ich allen beteiligten Studierenden für ihre Unterstützung danken. An dieser Stelle geht ein besonderer Dank an Niels Wrogemann, der mir als wissenschaftliche Hilfskraft während der gesamten Projektlaufzeit tatkräftig zur Seite gestanden hat. Weiterhin möchte ich dem Landwirten Henties danken, der mir für die durchgeführten Versuche seinen Ackerboden zur Verfügung gestellt hat.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und hier besonders meiner Frau Anne. Sie hat mich während meiner gesamten Institutszeit unterstützt und mir besonders bei der Erstellung der Dissertation den Rücken frei gehalten. Ohne sie wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Braunschweig, im März 2010

Bernd Niemöller



---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Hintergrund und Anwendungsmöglichkeiten .....	2
1.1.1	Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Bewässerungstechnik .....	2
1.1.2	Bodendekontaminierung durch Injektion von Flüssigkeiten .....	3
1.1.3	Pflanzenschutz mit Hilfe der Injektionstechnik.....	3
1.1.4	Möglichkeiten zur Injektionsdüngung mittels eines Hochdruckstrahls.....	4
1.2	Zielsetzung der Arbeit.....	5
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung und Technik</b> .....	<b>6</b>
2.1	Konventionelle Injektionsverfahren.....	8
2.2	Stand der Technik in der Wasserstrahltechnologie.....	11
2.2.1	Historische Entwicklung und Haupteinsatzgebiete der Wasserstrahltechnologie .....	12
2.2.2	Komponenten und Aufbau einer Hochdruckwasserstrahlanlage.....	14
<b>3</b>	<b>Theorie des Wasserstrahls</b> .....	<b>19</b>
3.1	Strahlbildung in der Düse.....	20
3.2	Der Freistrahл .....	21
3.3	Auftreffen auf den Werkstoff, Schädigung des Werkstoffes und Materialabtrag....	22
3.3.1	Betrachtung eines Einzeltropfens .....	23
3.3.2	Betrachtung eines Mehrfachtropfens .....	24
3.3.3	Einsatz von Abrasivmittel.....	25
3.3.4	Strahlkrümmung im Werkstoff.....	27
<b>4</b>	<b>Theoretische Ansätze der Bodenmechanik</b> .....	<b>29</b>
4.1	Aufgaben, Bestandteile und Zusammensetzung des Erdbodens .....	29
4.1.1	Mineralischer Bodenanteil .....	30
4.1.2	Organischer Bodenanteil.....	36

---

4.1.3	Porenanteil des Bodens .....	37
4.2	Physikalische Bodeneigenschaften .....	39
4.2.1	Der Mohrsche Spannungskreis .....	41
4.2.2	Ermittlung eines Fließortes .....	43
4.2.3	Der Fließort eines Bodens .....	45
4.2.4	Bindemechanismen von Böden .....	47
<b>5</b>	<b>Theorie zur Injektion von Wasser in den Erdboden mit einem Hochdruckstrahl .....</b>	<b>55</b>
5.1	Theoretische Betrachtungen des Schädigungsverhaltens .....	55
5.2	Strömungsverlauf des Wassers im Erdboden .....	58
5.3	Theoretische Betrachtung des Einflusses von Abrasivmittel .....	60
<b>6</b>	<b>Experimentelle Versuche .....</b>	<b>61</b>
6.1	Beschreibung der Versuchseinrichtung .....	61
6.1.1	Nassbereich .....	61
6.1.2	Trockenbereich .....	65
6.2	Versuchsdurchführung .....	66
6.2.1	Messung der Injektionstiefe und der spezifischen Injektionsenergie .....	67
6.2.2	Analyse des Verhaltens vom Wasserstrahl im Erdboden .....	72
6.2.3	Untersuchungen zum Verbleib des injizierten Wassers im Boden .....	73
6.3	Versuchsauswertung .....	74
<b>7</b>	<b>Versuchsergebnisse .....</b>	<b>78</b>
7.1	Messtechnische Analyse der Injektion .....	78
7.1.1	Variation des Wasserdrucks .....	78
7.1.2	Variation des Wasservolumenstroms .....	81
7.1.3	Variation der Vorschubgeschwindigkeit .....	82
7.1.4	Variation des Düsenabstandes .....	84
7.1.5	Variation des Injektionswinkels .....	85
7.1.6	Variation des Bodenwassergehaltes .....	87
7.1.7	Variation der Bodendichte .....	89



---

7.1.8	Einfluss von Abrasivmittel .....	90
7.1.9	Einfluss von gefrorenem Boden.....	92
7.1.10	Einfluss eines gepulsten Wasserstrahls.....	93
7.2	Optische Analyse der Injektion.....	94
7.2.1	Verspritzen von Wasser während der Injektion.....	95
7.2.2	Verlauf und Wirkweise des Wasserstrahls im Boden.....	97
7.2.3	Verbleib des Wassers im Erdboden .....	101
7.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse.....	103
<b>8</b>	<b>Hinweise für die Praxis .....</b>	<b>105</b>
8.1	Pulsen des Wasserstrahls.....	105
8.2	Korrosive Wirkung der Flüssigkeiten .....	107
8.3	Regelung der Injektionstiefe .....	108
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>109</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>111</b>

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Größe
a	m	Abstand zweier Bodenkörner
A	m <sup>3</sup>	Belastete Fläche
A <sub>in</sub>	m <sub>2</sub>	Injizierte Fläche
A <sub>kontr</sub>	mm <sup>3</sup>	Fläche des eingeschnürten Strahls
A <sub>Düse</sub>	mm <sup>3</sup>	Fläche des Düsendurchmessers
A <sub>Strahl</sub>	mm <sup>3</sup>	Querschnittsfläche eines Freistrahls
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
C	N/m <sup>2</sup>	Kohäsion
c <sub>c</sub>	-	Kontraktionszahl
c <sub>D</sub>	-	Geschwindigkeitszahl
c <sub>H</sub>	-	Hamaker-van-der-Waals-Konstante
d	m	Durchmesser einer kleinen Kugel
D	m	Durchmesser einer großen Kugel
d <sub>K</sub>	m	Korndurchmesser
d <sub>x</sub>	m	Länge in x-Richtung
d <sub>y</sub>	m	Länge in y-Richtung
ff <sub>c</sub>	-	Fließfähigkeit
F <sub>H</sub>	N	Haftkraft
F <sub>N</sub>	N	Normalkraft
F <sub>P</sub>	N	Randkraft
F <sub>R</sub>	N	Kapillarkraft
F <sub>S</sub>	N	Schubkraft

---

$F_{\text{Stoss}}$	N	Stoßkraft
$F_{\text{vdW}}$	N	Van-der-Waals-Kraft
$F_x$	N	Kraft in x-Richtung
$F_y$	N	Kraft in y-Richtung
$J_2$	kgm/s	Kinematischer Impuls eines Wasserelementes
$\dot{j}_2$	kgm/s <sup>2</sup>	Impulsfluss
$k$	-	Faktor zur Beschreibung eines Einzeltropfens
$K_V$	-	Anzahl der Körner pro Volumenelement
$L$	m	Länge eines Bodenelementes
$l_{\text{in}}$	m	Länge der Injektion
$M_T$	kg	Masse des trockenen Bodens
$M_{\text{Pumpe}}$	Nm	Antriebsdrehmoment der Pumpe
$M_W$	kg	Masse des Bodenwassers
$m_2$	kg	Masse eines Wasserelementes
$\dot{m}_2$	kg/s	Massenstrom eines Wasserelementes
$n$	-	Porenvolumenanteil
$N$	N	Normalkraft
$n_{\text{Pumpe}}$	min <sup>-1</sup>	Drehzahl der Pumpe
$O$	m <sup>2</sup>	Oberfläche einer Kugel
$p_K$	MPa	Kapillardruck
$p_{\text{in}}$	MPa	Druck bei der Injektion
$P_{\text{in}}$	kW	Wasserhydraulische Leistung
$p_{\text{Stau}}$	MPa	Staudruck
$p_{\text{Stoss}}$	MPa	Stoßdruck
$P_{\text{Pumpe}}$	kW	Leistung der Pumpe

## XII Formelzeichen und Abkürzungen

---

$p_1$	MPa	Wasserdruck vor der Düse
$p_2$	MPa	Wasserdruck nach der Düse
$Q_{in}$	l/min	Injizierter Volumenstrom
$r$	m	Durchmesser einer Kugel
$R$	N	Reibkraft
$R_f$	-	Raumfüllungsgrad
$R_1$	m	Erster Hauptkrümmungsradius
$R_2$	m	Zweiter Hauptkrümmungsradius
$s_{in}$	m	Injektionstiefe
$t_{in}$	s	Injektionszeit
$V$	$m^3$	Volumen einer Kugel
$V_{ges}$	$m^3$	Gesamtvolumen eines Bodenelementes
$V_i$	$m^3$	Wasservolumen einer Flüssigkeitsbrücke
$V_{in}$	$m^3$	Injiziertes Wasservolumen
$V_K$	$m^3$	Volumen eines Kornes
$V_L$	$m^3$	Volumen des Bodenwassers eines Bodenelementes
$V_V$	$m^3$	Volumen eines würfelförmigen, idealisierten Bodenelementes
$V_W$	$m^3$	Volumen der Bodenluft eines Bodenelementes
$v_1$	m/s	Wassergeschwindigkeit vor der Düse
$v_2$	m/s	Wassergeschwindigkeit nach der Düse
$w$	%	Bodenwassergehalt
$W_{in}$	J	Injektionsenergie
$W_{spez,in}$	J/mm m	Spezifische Injektionsenergie
$z_V$	-	Anzahl der Körner pro Volumeneinheit
$\alpha$	°	Winkel

---

$\alpha_{\text{Auftreff}}$	$^{\circ}$	Auftreffwinkel eines Abrasivkorns auf einen Werkstoff
$\varphi$	$^{\circ}$	Winkel der inneren Reibung
$\varepsilon$	-	Porenziffer
$\Phi$	-	Kontaktverhältnis
$\vartheta$	$^{\circ}$	Randwinkel
$\gamma_{\text{W}}$	N/m	Oberflächenspannung des Wassers
$\mu$	-	Reibbeiwert
$\pi$	-	Kreiszahl
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Dichte
$\rho_1$	$\text{kg/m}^3$	Wasserdichte vor der Düse
$\rho_2$	$\text{kg/m}^3$	Wasserdichte nach der Düse
$\sigma$	$\text{N/m}^2$	Normalspannung
$\sigma_a$	$\text{N/m}^2$	Ersatz-Normalspannung
$\sigma_C$	$\text{N/m}^2$	Gutfestigkeit
$\sigma_E$	$\text{N/m}^2$	Eingeleitete Normalspannung
$\sigma_h$	$\text{N/m}^2$	horizontale Normalspannung
$\sigma_m$	$\text{N/m}^2$	Mittelpunkt des Mohrschen Spannungskreises
$\sigma_N$	$\text{N/m}^2$	Normalspannung
$\sigma_r$	$\text{N/m}^2$	Radius des Mohrschen Spannungskreises
$\sigma_{\text{Si}}$	$\text{N/m}^2$	Abscherspannung
$\sigma_v$	$\text{N/m}^2$	vertikale Normalspannung
$\sigma_1$	$\text{N/m}^2$	Erste Hauptspannung
$\sigma_2$	$\text{N/m}^2$	Zweite Hauptspannung
$\tau$	$\text{N/m}^2$	Schubspannung

## XIV Formelzeichen und Abkürzungen

---

$\tau_a$	$N/m^2$	Ersatz-Schubspannung
$\tau_E$	$N/m^2$	Eingeleitete Schubspannung
$\tau_S$	$N/m^2$	Schubspannung

## Chemische Formelzeichen

Formelzeichen	Name
Al	Aluminium
Ca	Calcium
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
Fe	Eisen
H <sub>2</sub> O	Wasser
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Hydrogenphosphat-Ion
K	Kalium
Mg	Magnesium
Na	Natrium
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
O	Sauerstoff
Si	Silizium

## Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CULTAN	Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition
DBV	Druckbegrenzungsventil
etc.	und weitere
WAIS	Wasser-Abrasiv-Injektor-Strahlen
WASS	Wasser-Abrasiv-Suspension-Strahlen