**Detektion und Quantifizierung von
subaquatischen Porenwasserfreisetzungen
geringer Intensitäten**

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften
genehmigte Dissertation

von
Stephan Gubsch
aus Greifswald

2010

Tag der mündlichen Prüfung: 08. Juli 2010

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr. Dr. rer. nat. h.c. F. Keil

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. G. Gust
Prof. Dr.-Ing. W. Schneider

Weitere Gutachter: Prof. Dr.-Ing. W. Calmano
Prof. Dr. rer. nat. N. Hoffmann

Berichte aus der Umweltwissenschaft

Stephan Gubsch

**Detektion und Quantifizierung von
subaquatischen Porenwasserfreisetzungen
geringer Intensitäten**

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.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2010

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 978-3-8322-9551-6

ISSN 0946-7173

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zu großen Teilen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Meerestechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Dieses Institut wurde inzwischen in das Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik überführt.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. G. Gust, dem damaligen Leiter dieses Instituts, für die interessante Aufgabenstellung und die Betreuung der Promotion.

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Schneider vom Institut für Wasserressourcen und Wasserversorgung möchte ich für das Interesse an dieser Arbeit, die konstruktiven Gespräche und die Übernahme des zweiten Gutachtens danken. Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. F. Keil bin ich für seine Tätigkeit als Vorsitzender des Prüfungsausschusses verbunden.

Danken möchte ich darüber hinaus Herrn T. Viergutz für die Unterstützung bei der technischen Realisierung des Seepage-Meters.

Ferner gilt mein Dank Frau I. Albrecht und Herrn Dr.-Ing. J. Dührkop vom Institut für Geotechnik und Baubetrieb sowie Herrn Dr. rer. nat. A. Gröngroft vom Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg für die Durchführung von bodenkundlichen Untersuchungen an den von mir entnommenen Bodenproben. Herrn Dr. med. V. Grützediek danke ich in diesem Zusammenhang für die freundliche Hilfe bei der Erstellung von CT-Bildern.

Schließlich danke ich allen Mitarbeitern des Instituts für Meerestechnik für die gute Zusammenarbeit sowie allen Verwandten und Bekannten, vor allem meiner Freundin Kerstin Seiffert, für das mir entgegengebrachte Verständnis, die Geduld und die mir zuteil gewordene Unterstützung.

Rostock, September 2010

Stephan Gubsch

Inhaltsverzeichnis

Bedeutung der Symbole	XI
-----------------------	----

1. EINLEITUNG **1**

1.1 Anlass und Ziel	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2

2. STAND DER FORSCHUNG **5**

2.1 Begriffsbestimmung	5
2.2 Entstehungs- und Erscheinungsformen von Porenwasserfreisetzungen in marinen Gewässern	13
2.2.1 Porenwasserfreisetzungen aus submarinen Quellen (Typ I)	13
2.2.2 Porenwasserfreisetzungen aus Infiltrationszellen (Typ II)	14
2.2.3 Porenwasserfreisetzungen aus gemischten Quellen (Typ I/II)	16
2.3 Quantifizierung von Porenwasserfreisetzungen	19
2.3.1 Abschätzung von Porenwasserfreisetzungen auf Basis von Modellrechnungen	19
2.3.2 Abschätzung von Porenwasserfreisetzungen auf Basis von Tracern	20
2.3.3 Direkte Messung durch Einsatz von Seepage-Metern	21
2.3.4 Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Porenwasserfreisetzungen am Beispiel des Hydratrückens	24
2.2.5 Gerätespezifische Gründe für Messfehler	27
2.4 Zusammenfassende Beurteilung	19

3. NEUENTWICKLUNG EINES SEEPAGE-METERS FÜR VERBESSERTE FLUSSRATENMESSUNGEN **31**

3.1 Gerätebeschreibung	31
3.1.1 Erste Ausbaustufe	32
3.1.1.1 Grundaufbau und Funktionsweise des Seepage-Meters	32
3.1.1.2 Die Einzelkomponenten	33
3.1.2 Zweite Ausbaustufe	38
3.1.3 Integration und Funktionsweise der Seepage-Meter im GEOMAR-Trägersystem	41

3.2 Kalibrierungs- und Eignungstests.....	43
3.2.1 Methodischer Ansatz.....	43
3.2.2 Kalibrierung der Durchflusssensoren.....	44
3.2.3 Funktionstest der strömungsoptimierten Geräteöffnung.....	46
3.2.4 Analyse des Messverhaltens des Seepage-Meters unter Berücksichtigung des Durchflusswiderstandes.....	49
3.2.5 Evaluierung des Leckagetests und Bestimmung von effektiven Permeabilitäten.....	55
3.2.6 Funktionstest der Permeabilitätsmessung.....	60

4. GERÄTEEINSATZ ZUR SYSTEM- UND PROZESSIDENTIFIKATION AN

SEEP-LOKATIONEN **63**

4.1 Charakterisierungen der Untersuchungsgebiete.....	63
4.1.1 Der Hydratrücken.....	64
4.1.2 Das Dnepr Paleo-Delta.....	67
4.2 Feldmessungen.....	70
4.2.1 Untersuchungen am Hydratrücken.....	70
4.2.2 Untersuchungen im Dnepr Paleo-Delta.....	77
4.2.2.1 Flussratenmessungen.....	77
4.2.2.1 Sedimentologische Untersuchungen.....	82

5. SYSTEM- UND PROZESSIDENTIFIKATION **85**

5.1 Einleitung und Vorgehensweise.....	85
5.1.1 Der Simulationsalgorithmus.....	86
5.1.1.1 Relevante Grundgleichungen.....	86
5.1.1.2 Realisierung der numerischen Modelle.....	88
5.1.2 Ein Evaluierungsexperiment.....	89
5.2 Rolle der Bodenströmung bei der Generierung natürlicher Porenwasserfreisetzungen.....	92
5.2.1 Porenwasserfreisetzungen aus impermeablen Böden mit Frakturen.....	92
5.2.2 Porenwasserfreisetzungen aus permeablen Böden homogener und isotroper Struktur.....	95
5.3 Rolle der Bodenströmung bei der Detektion und Quantifizierung von Porenwasseraustauschraten.....	97

5.3.1 Messverhalten des FLUFOs als autonom arbeitendes Gerät.....	97
5.3.1.1 Konzeptionelles Modell.....	97
5.3.1.2 Numerische Untersuchungen.....	98
5.3.1.3 Validierungsexperimente.....	109
5.3.2 Messverhalten des FLUFOs unter Berücksichtigung des Absetzsystems.....	115
5.3.3 Messverhalten des FLUFOs unter Einbeziehung der Geländemorphologie.....	119
5.3.4 Effektive Empfindlichkeitsgrenzen des FLUFOs.....	122
5.4 Zur Rolle der Permeabilität.....	125
5.5 Bewertung der Felddaten.....	127
<u>6. MÖGLICHKEITN UND GRENZEN DER SEEPAGE-METER-TECHNOLOGIE</u>	129
6.1 Publierte Porenwasserfreisetzungen im Lichte der neuen Erkenntnisse.....	129
6.2 Erzielte Fortschritte und verbleibende Probleme.....	132
6.3 Konsequenzen und empfohlene Vorgehensweise.....	134
6.4 Optimierung des Messverhaltens von Seepage-Metern auf der Basis konstruktiver Änderungen.....	137
6.4.1 Verbesserung des Messverhaltens durch strömungsgünstigere Formgebung des Absetzgestells.....	137
6.4.2 Verbesserung des Messverhaltens durch vergrößerte Zylinderdurchmesser und Eindringtiefen.....	139
<u>7. RESÜMEE</u>	143
<u>8. LITERATURVERZEICHNIS</u>	147
<u>9. ANHANG</u>	154

Bedeutung der Symbole

Allgemeine Hinweise

In der Arbeit verwendete physikalische Größen werden durch kursive Symbole gekennzeichnet. Hierbei werden vektorielle Größen fett markiert. Skalare Größen und Beträge von Vektoren werden nicht fett dargestellt.

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Physikalische Größe
A	$[\text{m}^2]$	Fläche
A_M	$[\text{m}^2]$	Messfläche
c	$[\text{mol m}^{-3}]$	Konzentration
D	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	Diffusionskoeffizient
D_A	$[\text{m}]$	Durchmesser des Messzylinders
F	$[\text{N m}^{-3}]$	Volumenkraft
f	$[\text{s}^{-1}]$	Coriolisparameter
f_{rel}	$[\%]$	relativer Fehler, relative Messabweichung
g	$[\text{m s}^{-2}]$	Fallbeschleunigung
h	$[\text{m}]$	Höhe
h_{Rau}	$[\text{m}]$	Rauheit
Imp	$[\text{n/v}]$	Anzahl der Impulse
J	$[\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$	Teilchenstromdichte
k_f	$[\text{m s}^{-1}]$	Durchlässigkeitsbeiwert
K	$[\text{m}^2]$	Permeabilität
K_{Anfang}	$[\text{m}^2]$	vorgegebener Anfangswert der Permeabilität
K_{eff}	$[\text{m}^2]$	effektive Permeabilität
l	$[\text{m}]$	Länge
L_E	$[\text{m}]$	Dicke der Ekman-Schicht
N	$[\text{n/v}]$	Anzahl der Datenpunkte
P_D	$[\text{m}]$	Eindringtiefe der Messkammer
p	$[\text{Pa}]$	Druck
p_{dyn}	$[\text{Pa}]$	dynamischer Druck

p_{dyn}^{∞}	[Pa]	dynamischer Druck außerhalb der Störungszone
p_{geo}	[Pa]	geodätischer Druck
p_{gesamt}	[Pa]	Gesamtdruck
p_{stat}	[Pa]	statischer Druck
p'	[Pa]	hydrostatischer Druck des unbewegten Systems
p^*	[Pa]	strömungsbedingter Druck
p_{ext}	[Pa]	strömungsbedingter Druck an der Sedimentoberfläche in der Umgebung des Messzylinders
p_{int}	[Pa]	strömungsbedingter Druck an der Sedimentoberfläche innerhalb des Messzylinders (Messfläche)
p_{max}	[Pa]	maximaler strömungsbedingter Überdruck
p_{min}	[Pa]	maximaler strömungsbedingter Unterdruck
Q	[m ³ s ⁻¹]	Flussrate
Q_{in}	[m ³ s ⁻¹]	Einstromrate
Q_{out}	[m ³ s ⁻¹]	Ausstromrate
Q_{Mess}	[m ³ s ⁻¹]	gemessene Flussrate
Q_{Fit}	[m ³ s ⁻¹]	über Fit-Funktion ermittelte Flussrate
Q_r	[m ³ s ⁻¹]	vorgegebene Flussrate
Q_{Leck}	[m ³ s ⁻¹]	Leckagerate
$Q_{Leck}^{Simulation}$	[m ³ s ⁻¹]	berechnete Leckagerate
Q_{Leck}^{Labor}	[m ³ s ⁻¹]	gemessene Leckagerate
$R_{Gerät}$	[Pa m ³ s]	Durchflusswiderstand des Gerätes
r_{τ}	[n/v]	Korrelationskoeffizient
s	[variabel]	Standardabweichung
t	[s]	Zeit
U	[V]	Spannung
u	[m s ⁻¹]	Geschwindigkeit
u_{bl}	[m s ⁻¹]	Geschwindigkeit der Bodenströmung
u_{bl}^{∞}	[m s ⁻¹]	Geschwindigkeit der Bodenströmung außerhalb der Störungszone

u_D	[m s ⁻¹]	Darcygeschwindigkeit
$\bar{u}_D$	[m a ⁻¹]	über Messfläche gemittelte Darcygeschwindigkeit
$\bar{u}_{D_{\max}}$	[m a ⁻¹]	Maximalwert von $\bar{u}_D$
$\bar{u}_{D_{\max}}^{ext}$	[m a ⁻¹]	aufgrund des Druckfeldes p_{ext} generiertes $\bar{u}_{D_{\max}}$
$\bar{u}_{D_{\max}}^{int}$	[m a ⁻¹]	aufgrund des Druckfeldes p_{int} generiertes $\bar{u}_{D_{\max}}$
$\bar{u}_D^{total}$	[m a ⁻¹]	Gesamtwert von $\bar{u}_D$
$\bar{u}_D^{u_{st}}$	[m a ⁻¹]	aufgrund der Bodenströmung generiertes $\bar{u}_D$
$\bar{u}_D^{u_{st}-Gerät}$	[m a ⁻¹]	als Folge der Wechselwirkung zwischen Bodenströmung und Gerät erzeugtes $\bar{u}_D$
$\bar{u}_D^{u_{st}-morph}$	[m a ⁻¹]	als Folge der Wechselwirkung zwischen Bodenströmung und natürlicher Morphologie erzeugtes $\bar{u}_D$
$\bar{u}_D^{u_{st}-Kombi}$	[m a ⁻¹]	als Folge der Wechselwirkung zwischen Bodenströmung und Gesamtmorphologie (natürliche Morphologie + Gerät) erzeugtes $\bar{u}_D$
$\bar{u}_D^{non-u_{st}}$	[m a ⁻¹]	unabhängig von der Bodenströmung generiertes $\bar{u}_D$
$\bar{u}_D^*$	[m a ⁻¹]	$\bar{u}_D$ einschließlich Fehlergrenzen
$\bar{u}_D^{MW}$	[m a ⁻¹]	Messwert von $\bar{u}_D$
$\bar{u}_D^{Max}$	[m a ⁻¹]	obere Fehlergrenze von $\bar{u}_D$
$\bar{u}_D^{Min}$	[m a ⁻¹]	untere Fehlergrenze von $\bar{u}_D$
$\bar{u}_D^{Grenz}$	[m a ⁻¹]	Empfindlichkeitsgrenzen von $\bar{u}_D$
u_*	[m s ⁻¹]	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
V	[m ³]	Volumen
x, y, z	[m]	Ortskoordinaten
z	[m]	Ortshöhe

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Physikalische Größe
Δ	[n/v]	Laplace-Operator, Differenz, Änderung
$\pm \Delta \bar{u}_D$	[m a ⁻¹]	Fehlergrenzen von $\bar{u}_D$
Δh	[m]	Standrohrspiegelhöhe
Δl	[m]	Weglänge
Δp	[Pa]	Differenzdruck
Δt	[s]	zeitliche Änderung
δ_l	[m]	Dicke der logarithmischen Schicht
δ_v	[m]	Dicke der viskosen Schicht
ε	[n/v]	Genauigkeit
η	[kg m ⁻¹ s ⁻¹]	Viskosität
ρ	[kg m ⁻³]	Dichte
τ	[s]	Zeitschritt, Lag
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematische Viskosität
∇	[n/v]	Nabla-Operator

Abkürzungen

FLUFO	<u>F</u> luid- <u>F</u> lux- <u>O</u> bservatory (Komplettversion mit vollständigem Sensorsatz und Zusatzfunktionen)
FLUFO-HDS	<u>F</u> luid- <u>F</u> lux- <u>O</u> bservatory (eingeschränkte Version mit thermischem Durchflusssensor)
HDS	thermischer Durchflusssensor (<u>h</u> ydro <u>d</u> ynamic <u>s</u> ensor)