



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

ZUR SELBSTBELÜFTETEN GERINNESTRÖMUNG AUF
KASKADEN MIT GEMÄSSIGTER NEIGUNG

Vom Fachbereich D (Abteilung Bauingenieurwesen)
der Bergischen Universität Wuppertal

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. Daniel B. Bung

aus Düren

© 2009 LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal
Vervielfältigung nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Autors
Daniel B. Bung • Pauluskirchstr. 7 • 42285 Wuppertal • bung@uni-wuppertal.de

Eingereicht am: 12. März 2009

Prüfung am: 10. Juli 2009

Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas SCHLENKHOF
LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau
Bergische Universität Wuppertal

Zweiter Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten SCHLURMANN
Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen
Leibniz Universität Hannover

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen EHRIG
LuFG Abfall- und Siedlungswasserwirtschaft
Bergische Universität Wuppertal

Weiteres Mitglied: Prof. Dr. rer. nat. habil. Gerd MORGENSCHWEIS
Ruhrverband, Essen

Bericht – Lehr- und Forschungsgebiet
Wasserwirtschaft und Wasserbau

Band 16

Daniel B. Bung

**Zur selbstbelüfteten Gerinneströmung auf
Kaskaden mit gemäßigter Neigung**

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.: Wuppertal, Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8382-7

ISSN 0179-9444

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

Für Katja und
meine Mutter Roswitha.

VORWORT (HRSG.)

Kaskaden haben wegen der im modernen Wasserbau zunehmend eingesetzten Betonbauweise im RCC-Verfahren wieder stark an Bedeutung gewonnen. Die durch die Treppenstufen erzeugte Makrorauheit führt zu einer Reduzierung der Fließgeschwindigkeiten und somit zu einer größeren Energieumwandlung im Vergleich zu herkömmlichen Schussrinnen. Weitere Effekte sind eine frühere Selbstbelüftung und die damit verbundene reduzierte Kavitationsgefahr. Die frühere Selbstbelüftung und die niedrigeren Geschwindigkeiten bewirken aber auch eine Begünstigung des durch die eingetragenen Luftblasen stattfindenden Gasaustauschs.

Insgesamt stellt die selbstbelüftete Strömung auf Kaskaden durch die hohen Geschwindigkeiten, den ungleichförmigen und stark beschleunigten Verlauf längs der Kaskadenstufen, den hohen Turbulenzgrad, den schießenden Abfluss und die Luftaufnahme eine sehr komplexe Abflusssituation dar.

Beide Prozesse – der Lufteintrag und Gasaustausch – wurden wegen der hohen Bedeutung im Wasserbau schon mehrfach untersucht. Dennoch ist der Vorgang der Selbstbelüftung und deren Auswirkungen auf das Abflussgeschehen und den Gasaustausch noch nicht vollständig verstanden. Für Kaskaden mit gemäßigter Neigung liegen zudem keine empirischen Ergebnisse vor.

Die vorliegende Arbeit basiert auf hydraulischen Versuchen, die im Wasserbaulabor der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt wurden. Dem planenden Ingenieur wird durch diese Dissertation zudem ein Leitfaden zur Bemessung zur Verfügung gestellt, welcher eine Bestimmung aller maßgebenden hydraulischen Parameter ermöglicht und eine Abschätzung des Sauerstoffeintrags erlaubt.

Wuppertal, Juli 2009

Andreas Schlenkhoff

DANKSAGUNG

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff bedanken. Durch sein Vertrauen, welches er mir mit der Anstellung als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am LuFG „Wasserwirtschaft und Wasserbau“ entgegenbrachte, hat er mir den Weg zu dieser Dissertation geebnet. Er überließ mir alle konzeptionellen Freiheiten und stellte mir die benötigten finanziellen Mittel und alle Zeit bei der Durchführung der Modellversuche und dem Verfassen der Arbeit zur Verfügung. Diese besondere Unterstützung, aber auch das freundschaftliche Arbeitsverhältnis und sein stets offenes Ohr waren eine große Hilfe.

Auch bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann für die Übernahme des Koreferats und für die in mir entfachte Begeisterung für die Hydromechanik während des Studiums.

Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Ehrig. Hinsichtlich der schwierigen Durchführung und Auswertung der Sauerstoffmessungen war er immer für hilfreiche Diskussionen ansprechbar.

Bei Prof. Dr. rer. nat. habil. Gerd Morgenschweis bedanke ich mich für die Teilnahme an der Prüfungskommission und für viele motivierende Gespräche. Meinem Kollegen Dr.-Ing. Mario Oertel möchte ich für eine besondere Zusammenarbeit und seine moralische und fachliche Unterstützung danken. Die gemeinsame Arbeit mit einem guten Freund hat mir viel Freude gemacht.

Allen studentischen Hilfskräften danke ich für die häufigen, arbeitsintensiven Auf- und Umbauarbeiten am physikalischen Modell im Wasserbaulabor. Melanie Sichelschmidt gilt mein Dank für die Übernahme organisatorischer und administrativer Aufgaben. Beim LuFG „Abfall- und Siedlungswasserwirtschaft“ bedanke ich mich für die Hilfe bei der Durchführung der Absorptionsmessungen.

Besonders dankbar bin ich meiner Frau Katja. Mit viel Geduld und Verständnis für die große Einschränkung unserer gemeinsamen Freizeit während der letzten drei Jahre hat sie mich unterstützt und mir immer die Gewissheit gegeben, dass sich die Mühe auszahlt. Zuletzt danke ich meinem Bruder Michael für so manche handwerkliche Hilfe und meiner Familie und allen Freunden für die vielen motivierenden Worte.

„Remember when discoursing about water
or fluids to adduce first experience and
then reason.“

Leonardo da Vinci (1452-1519)

KURZFASSUNG

Diese Dissertation befasst sich mit der selbstbelüfteten Gerinneströmung auf Kaskaden mit gemäßiger Neigung. Hierunter werden getreppte Gerinne mit einer Längsneigung von 1:3 bis 1:2 verstanden. Sowohl die hydromechanischen Vorgänge als auch der Gasaustauschprozess werden in physikalischen Modellversuchen im Maßstab 1:10 untersucht. Messungen des Luftgehalts und der Fließgeschwindigkeit mit einer doppelköpfigen Nadelsonde liefern Informationen zum Belüftungsprozess und der erzielbaren Energiedissipation. Das Wiederbelüftungspotential des Bauwerks wird durch Absorptionsmessungen bestimmt. Da nicht nur hydraulische sondern auch geometrische Randbedingungen das Fließgeschehen beeinflussen, erfolgt neben der Änderung des Durchflusses auch eine Variation des Neigungswinkels ($\varphi = 18,4^\circ$ und $\varphi = 26,6^\circ$) und der Stufenhöhe ($s = 3$ cm und $s = 6$ cm). Weitere Untersuchungen ermitteln den Einfluss kleinerer auf die horizontalen Stufenflächen aufgebracht Formwiderstände und den Einfluss der Stufen im Vergleich zu herkömmlichen Schussrinnen.

Die Darstellung aller hydraulischen Parameter erfolgt in dimensionsloser Form, um die Übertragung auf Prototypen zu ermöglichen. Durch die Entwicklung empirischer Gleichungen, welche auch bei nicht erreichtem Normalabfluss Gültigkeit haben, ist die Anwendung aller Ergebnisse auf Bauwerke beliebiger Höhe zulässig. Neben einer funktionalen Beschreibung des Selbstbelüftungspunkts werden Gleichungen zur Abschätzung der Fließtiefe, der Fließgeschwindigkeit und des zu erwartenden Luftgehalts sowie zum Fließwiderstand und der Energiedissipation entwickelt. Die für den Gasaustausch zur Verfügung stehende Oberfläche und die Geschwindigkeit des Massenübergangs von Sauerstoff werden ebenso beschrieben wie die Belüftungseffizienz.

Die Arbeit bietet somit eine vollständige Dimensionierungshilfe für Gerinneströmungen auf Treppenschussrinnen mit gemäßiger Neigung. Bemessungsbeispiele erläutern die Anwendung der entwickelten Formeln anhand in der Praxis relevanter Fragestellungen.

ABSTRACT

This dissertation deals with self-aerated skimming flows on embankment stepped spillways with slopes from 1:3 to 1:2. Hydrodynamic processes and gas transfer are investigated on a physical model with a scale of 1:10. Measurements of air concentration and flow velocities with a double-tip conductivity probe provide information about the aeration process and the achievable energy dissipation. Re-aeration potential of the building is determined by applying the absorption method. Since flow pattern is influenced by hydraulic and geometric boundary conditions, the spillway slope ($\phi = 18.4^\circ$ and $\phi = 26.6^\circ$) is varied as well as the step height ($s = 3$ cm and $s = 6$ cm) and the discharge. Further analyses quantify both the effect of a micro-scale surface roughness fixed on the horizontal treads and the influence of the macro-roughness enhanced by the steps in comparison to smooth spillways.

Hydraulic parameters are presented in dimensionless form for scaling to prototypes. By developing empirical equations valid for both non-uniform and uniform flow region, formulas are applicable for all drop heights. In addition to the description of the inception point of air-entrainment approaches for estimation of the flow depth, flow velocity, air concentration, friction factor and energy dissipation are developed. The specific surface available for gas transfer and the mass transfer coefficient of oxygen are described as well as the aeration efficiency.

Hence, this work offers a complete guidance for the design of embankment stepped spillways with skimming flow regime. Design examples demonstrate the application of developed formulas to practical problems.

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung	V
Kurzfassung	IX
Abstract	XI
Variablenverzeichnis	XIX

I Einführung	1
1 Hydraulik getreppter Gerinne	3
1.1 Allgemeines	3
1.2 Kaskadenströmung („Nappe Flow“)	3
1.3 Übergangsströmung („Transition Flow“)	10
1.4 Gerinneströmung („Skimming Flow“)	16
1.4.1 Allgemeines	16
1.4.2 Fließbereiche	18
1.4.3 Selbstbelüftungspunkt	18
1.4.4 Gleichförmiger Fließbereich	25
1.4.5 Fließtiefe	27
1.4.6 Luftgehalt	29
1.4.7 Fließgeschwindigkeit	36
1.4.8 Fließwiderstand	39
1.4.9 Energiedissipation	46
1.5 Zusammenfassung	49
2 Theorie des Gasaustauschs	51
2.1 Allgemeines	51
2.2 Grundlagen	51
2.2.1 Diffusion und Massenübergang	51
2.2.2 Bestimmung des Massenübergangskoeffizienten	53

2.2.3	Spezifische Oberfläche	55
2.2.4	Luftblasenfrequenzen	57
2.3	Belüftungseffizienz	59
2.3.1	Allgemeines	59
2.3.2	Belüftungseffizienz an Kaskaden	60
3	Forschungsansatz	65
3.1	Motivation	65
3.2	Ziel der Arbeit	66
<hr/>		
II	Hydraulisches Versuchswesen	67
4	Physikalisches Modellieren	69
4.1	Allgemeines	69
4.2	Froude'sches Ähnlichkeitsgesetz	70
4.3	Dimensionsanalyse und Maßstabeffekte	72
4.4	Zusammenfassung	80
5	Versuchsdurchführung	83
5.1	Konstruktionsbeschreibung	83
5.2	Messinstrumente	85
5.2.1	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser	85
5.2.2	Ultraschallsensoren	86
5.2.3	Messgeräte zur Bestimmung des gelösten Sauerstoffs	87
5.2.4	Messgerät zur Bestimmung der Leitfähigkeit	90
5.2.5	Nadelsonde zur Bestimmung des Luftgehalts	91
5.3	Bestimmung des Sauerstoffzufuhrvermögens	100
5.3.1	Allgemeines	100
5.3.2	Absorptionsmessungen	100
5.3.3	Regressionsanalyse	102
5.3.4	Sauerstoffsättigung	103
5.3.5	Standard-Sauerstoffzufuhr	104
<hr/>		
III	Ergebnisse der physikalischen Modellversuche	107
6	Gemischabflussmessungen	109
6.1	Vorversuche	109

6.1.1	Sensitivitätsanalysen	109
6.1.2	Reproduzierbarkeit der Messungen	116
6.2	Kaskaden mit glatter Stufenoberfläche	117
6.2.1	Allgemeines	117
6.2.2	Selbstbelüftungspunkt	117
6.2.3	Gleichförmiger Fließbereich	122
6.2.4	Fließtiefe	127
6.2.5	Luftgehalt	130
6.2.6	Fließgeschwindigkeit	134
6.2.7	Fließwiderstand	147
6.2.8	Energiedissipation	150
6.2.9	Blasenfrequenz und Spezifische Oberfläche	153
6.2.10	Zusammenfassung	160
6.3	Einfluss einer punktuellen Mikrorauheit	162
6.3.1	Allgemeines	162
6.3.2	Selbstbelüftungspunkt	164
6.3.3	Gleichförmiger Fließbereich	166
6.3.4	Fließtiefe	166
6.3.5	Luftgehalt	169
6.3.6	Fließgeschwindigkeit	170
6.3.7	Fließwiderstand	178
6.3.8	Energiedissipation	179
6.3.9	Blasenfrequenz und Spezifische Oberfläche	180
6.3.10	Fazit	184
6.4	Vergleichende Untersuchung einer herkömmlichen Schusrrinne	185
6.4.1	Allgemeines	185
6.4.2	Selbstbelüftungspunkt	186
6.4.3	Gleichförmiger Fließbereich	189
6.4.4	Fließtiefe	189
6.4.5	Luftgehalt	192
6.4.6	Fließgeschwindigkeit	194
6.4.7	Fließwiderstand	197
6.4.8	Energiedissipation	197
6.4.9	Blasenfrequenz und Spezifische Oberfläche	198
6.4.10	Fazit	201
7	Sauerstoffmessungen	203
7.1	Vorversuche	203

7.1.1	Einfluss des Salzgehalts auf die Sauerstoffsättigung	203
7.1.2	Sauerstoffeintrag im Unterwasser	203
7.1.3	Reproduzierbarkeit der Sauerstoffmessungen	204
7.2	Hauptuntersuchungen	205
7.2.1	Allgemeines	205
7.2.2	Massenübergangskoeffizient	206
7.2.3	Belüftungseffizienz	208
7.2.4	Skalierbarkeit der Belüftungseffizienz	213
7.2.5	Zusammenfassung	215
8	Zusammenstellung der Ergebnisse	217
8.1	Fazit	217
8.2	Bemessungsformeln	218
8.3	Weiterer Forschungsbedarf	222
	Literaturverzeichnis	225
<hr/>		
IV	Anhang	237
A	Konstruktionspläne zum Modellaufbau	239
B	Fotodokumentation des Modellaufbaus	245
C	Fotos verschiedener Modellversuche	249
D	Validierung des Luftblasenmesssystems	251
E	Äquivalente Sandrauheit punktueller Formwiderstände	255
F	Daten aus Gemischabflussmessungen	257
F.1	Fließtiefen und mittlere Luftgehalte	257
F.1.1	Modellversuche mit glatter Stufenoberfläche	257
F.1.2	Modellversuche mit punktueller Mikrorauheit	260
F.2	Luftgehaltsverteilungen	261
F.2.1	Modellversuche mit glatter Stufenoberfläche	261
F.2.2	Modellversuche mit punktueller Mikrorauheit	267
F.2.3	Modellversuche auf herkömmlicher Schussrinne mit gestaffelter Mikrorauheit	271
F.3	Mittlere spezifische Oberfläche	272

F.3.1	Modellversuche mit glatter Stufenoberfläche	272
F.3.2	Modellversuche mit punktueller Mikrorauheit	275
F.3.3	Modellversuche auf herkömmlicher Schussrinne mit gestaffelter Mikrorauheit	276
G	Regressionsparameter aus Sauerstoffmessungen	277
G.1	Korrektur der Belüftungsparameter	277
G.2	Anlagenspezifische Belüftungsparameter	279
G.3	Bauwerkspezifische Belüftungsparameter	281
G.4	Massenübergangskoeffizienten	284
G.5	Berechnete Belüftungseffizienzen	285
G.5.1	Modellversuche mit punktueller Mikrorauheit	285
G.5.2	Modellversuche auf herkömmlicher Schussrinne mit gestaffelter Mikrorauheit	286
H	Bemessungsbeispiel	287
H.1	Allgemeines	287
H.2	Bestimmung der erforderlichen Wandhöhe	288
H.3	Bestimmung der Bodenluftkonzentration	289
H.4	Bestimmung der Restenergiehöhe	290
H.5	Bestimmung der Belüftungseffizienz	292
	Lebenslauf	293

VARIABLENVERZEICHNIS

Zeichen	Benennung	Einheit
a	spezifische Oberfläche zwischen Luft und Wasser ($a = A/V$)	1/m
a_k	Abstand zweier punktueller Rauheitselemente in Fließrichtung	m
$a_{s,erf}$	erforderliche Schützöffnung im Oberwasser zur Einhaltung einer maximalen Energiehöhe	m
$\bar{a}_z, \bar{a}_{z,j}$	mittlere spezifische Oberfläche zwischen Luft und Wasser an einem Fließquerschnitt (j)	1/m
$\bar{a}_{z,1-2}$	mittlere spezifische Oberfläche zweier aufeinander folgender Querschnitte 1 und 2	1/m
A	absolute Grenzfläche zwischen Luft und Wasser ($A = a \cdot V$)	m ²
$A_{1..4}$	Koeffizienten zur Bestimmung der Standard-Sättigungskonzentration $C_{S,S,t,T}$ nach WEISS (1970)	-
A_k	Fläche der Frontalprojektion eines punktuellen Rauheitselements	m ²
A_w	durchflossener Querschnitt ($A_w = h_w \cdot b$)	m ²
b	Gerinnebreite	m
B	Koeffizient zur Bestimmung der Restenergiehöhe bei Gerinneströmung nach BOES & HAGER (2003A)	-
$B_{1..3}$	Koeffizienten zur Bestimmung der Standard-Sättigungskonzentration $C_{S,S,t,T}$ nach WEISS (1970)	-
c_1, c_2, c_3	Regressionskoeffizienten bei Bestimmung von C_b nach MATOS ET AL. (2000)	-
C	Luftgehalt an einem Fließquerschnitt	-
\bar{C}, \bar{C}_j	mittlerer Luftgehalt an einem Fließquerschnitt (j)	-
\bar{C}_{1-2}	mittlerer Luftgehalt zweier aufeinander folgender Querschnitte 1 und 2	-
C_b	Luftgehalt am Pseudo-Boden	-
$C_{fB,max}$	Luftkonzentration mit maximaler Blasenfrequenz	-
C_G	Konzentration eines Gases in einer Gasphase	mg/l, %
C_{gas}	Konzentration eines Gases	mg/l, %
\bar{C}_{gas}	mittlerer Luftgehalt auf der Strecke L_d	-
\bar{C}_i	mittlerer Luftgehalt am Selbstbelüftungspunkt	-
C_L	Konzentration eines Gases in einer liquiden Phase	mg/l, %
$C_{L,0}$	Sauerstoffkonzentration zu Beginn eines Absorptionsversuchs	mg/l, %
$C_{L,j}, C_{L,k}$	Sauerstoffkonzentration am Fließquerschnitt j bzw. k	mg/l, %
$C_{L,ow}$	Konzentration eines Gases (Sauerstoff) im Oberwasser eines Fließgewässers	mg/l, %

Zeichen	Benennung	Einheit
$C_{L,uw}$	Konzentration eines Gases (Sauerstoff) im Unterwasser eines Fließgewässers	mg/l, %
C_S	Sättigungskonzentration eines Gases in einer liquiden Phase	mg/l, %
$C_{S,20}$	Versuchssauerstoffsättigungswert bei Standardbedingungen ($T = 20\text{ °C}$ und $p = 1.013\text{ hPa}$)	mg/l, %
$C_{S,p,T}$	Sauerstoffsättigungswert bei Druck p und Temperatur T	mg/l, %
$C_{S,p^*,T}$	Versuchssauerstoffsättigungswert bei Versuchsbedingungen	mg/l, %
$C_{S,st,20}$	Sättigungskonzentration für Standardbedingungen ($T = 20\text{ °C}$ und $p = 1.013\text{ hPa}$)	mg/l %
$C_{S,st,T}$	Standard-Sättigungskonzentration bei Temperatur T und $p = 1.013\text{ hPa}$	mg/l %
\bar{C}_u	mittlerer Luftgehalt im gleichförmigen Fließbereich	-
d_B	idealisierte Blasendurchmesser	m
$d_{B,min}$	kleinste messbare Blasengröße	m
d_i	Durchmesser der Innenelektrode der Nadelsonde	m
d_T	idealisierte Tropfendurchmesser	m
D'	dimensionsloser Diffusionskoeffizient bei Luftgehaltsmodell nach CHANSON (1996)	-
D_0	Koeffizient bei Luftgehaltsmodell für Übergangsströmung TRA2 und Gerinneströmung nach CHANSON & TOOMBES (2001)	-
D_{gas}	Diffusionskoeffizient eines Gases	m ² /s
D_H	hydraulischer Durchmesser ($D_H = 4 \cdot A_w / U_w$)	m
$D_{H,eff}$	formkorrigierter effektiver hydraulischer Durchmesser nach SCHRÖDER (1990) ($D_{H,eff} = m \cdot 4 \cdot A_w / U_w$)	m
$D_t, D_{t,z}$	turbulenter Diffusionskoeffizient (Anteil in z-Richtung)	m ² /s
E, E_{20}	Belüftungseffizienz $E = 1 - 1/r$ (bei $T = 20\text{ °C}$)	-
E_1	Belüftungseffizienz der ersten Stufe bei Kaskadenströmung	-
$E_m, E_{20,m}$	Belüftungseffizienz im Modell (bei $T = 20\text{ °C}$)	-
$E_p, E_{20,p}$	Belüftungseffizienz des Prototyps (bei $T = 20\text{ °C}$)	-
E_s	Belüftungseffizienz des Wasserstrahls bei Kaskadenströmung NA1	-
E_{ws}	Belüftungseffizienz des Wechselsprungs bei Kaskadenströmung NA1	-
f	Fließwiderstand nach Darcy-Weisbach	-
f_b	Anteil des Pseudo-Bodens am gesamten Fließwiderstand	-
$f_{b,u}$	Anteil des Pseudo-Bodens am Gesamtwiderstand $f_{ges,u}$ bei Normalabfluss	-
f_{ges}	Gesamtwiderstand aus Anteilen von Boden f_b und seitlicher Wandung f_w	-
$f_{ges,u}$	Gesamtwiderstand aus Anteilen von Boden $f_{b,u}$ und seitlicher Wandung $f_{w,u}$ bei Normalabfluss	-
f_m	Fließwiderstand auf Basis der Gemischabflusstiefe h_m	-
f_u	Fließwiderstand nach Darcy-Weisbach im gleichförmigen Fließbereich	-

Zeichen	Benennung	Einheit
f_w	Anteil des seitlichen Wände am gesamten Fließwiderstand	-
$f_{w,u}$	Anteil der seitlichen Wände am Gesamtwiderstand $f_{ges,u}$ bei Normalabfluss	-
F_B	Blasenfrequenz	Hz
$F_{B,max}$	maximale Blasenfrequenz an einem Querschnitt	Hz
F_s	Messfrequenz	Hz
$F_{s,erf}$	erforderliche Messfrequenz	Hz
Fr	Froudezahl	-
Fr_*	oberflächenrauheitsbezogene Froudezahl	-
Fr_0	Froudezahl oberhalb des Absturzes bei Kaskadenströmung NA3	-
Fr_1	Froudezahl vor Wechselsprung	-
$Fr_{ow,e}$	Froudezahl an oberwasserseitiger Stufenecke	-
Fr_s	makrorauheitsbezogene Froudezahl	-
g	Gravitationskonstante	m/s ²
h_0	Fließtiefe oberhalb des Absturzes bei Kaskadenströmung NA3	m
h_1	Fließtiefe vor Wechselsprung	m
$h_{1,uw}$	Fließtiefe vor Wechselsprung auf der letzten Stufe bei Kaskadenströmung	m
h_2	Fließtiefe hinter Wechselsprung	m
h_{90}	Gemischabflusstiefe (Fließtiefe mit $C = 0,90$)	m
h_{99}	Tropfenhöhe (Fließtiefe mit $C = 0,99$)	m
h_c	Grenzabflusstiefe ($h_c = q_w^{2/3} / g^{1/3}$)	m
h_e	Abflusstiefe an Stufenecke bei Kaskadenströmung	m
h_i	Abflusstiefe am Selbstbelüftungspunkt	m
h_m	allgemeine Gemischabflusstiefe	m
$h_{m,u}$	allgemeine Gemischabflusstiefe im gleichförmigen Fließbereich	m
h_p	Höhe des Wasserpolsters in Stufennische bei Kaskadenströmung	m
h_s	Dicke des Wasserstrahls bei Kaskadenströmung	m
h_v	Energieverlusthöhe	m
h_w	Reinwasserabflusstiefe ($h_w = h_m \cdot (1 - \bar{C})$)	m
$h_{w,0}$	Abflusstiefe im Zulaufkanal	m
$h_{w,i,min}$	erforderliche Reinwasserabflusstiefe am Selbstbelüftungspunkt zur Vermeidung von Maßstabeffekten nach KOBUS (1984)	m
$h_{w,u}$	Reinwasserabflusstiefe im gleichförmigen Fließbereich ($h_{w,u} = (1 - \bar{C} \cdot h_{m,u})$)	m
H_0	Energiehöhe im Zulaufkanal ($H_0 = h_{w,0} + u_{w,0}^2 / 2 \cdot g$)	m
$H_{1,uw}$	verbleibende Energiehöhe im Unterwasser bei Kaskadenströmung	m
H_{dam}	gesamte Bauwerkshöhe ($H_{dam} = N \cdot s$)	m
$H_{dam,f}$	zurückgelegte Fallhöhe	m
$H'_{dam,f}$	zurückgelegte Fallhöhe in dimensionsloser Form ($H'_{dam,f} = H'_{dam,f} / H_{dam,u}$)	m

Zeichen	Benennung	Einheit
$H_{dam,u}$	erforderliche Bauwerkshöhe zum Erreichen eines gleichförmigen Fließzustands	m
H_G	Henry-Koeffizient	-
H_{max}	maximale Energiehöhe an Bauwerkskrone	m
H_{res}	verbleibende Energiehöhe im Unterwasser bei Gerinne-strömung	m
I_E	Energieliniengefälle	-
J_{gas}	Massenstromdichte eines Gases	mg/(m ² s)
k	Massenübergangskoeffizient	m/s
k_G	gaseitiger Massenübergangskoeffizient	m/s
$k_L, k_{L,20}$	liquidseitiger Massenübergangskoeffizient (bei $T = 20\text{ °C}$)	m/s
$k_L a_{20}$	allgemeiner Belüftungskoeffizient bei $T = 20\text{ °C}$	1/h
$(k_L a_{20})_{BW}$	bauwerkspezifischer Belüftungskoeffizient bei $T = 20\text{ °C}$	1/s
$(k_L a_{20})_{WK}$	anlagenspezifischer Belüftungskoeffizient bei $T = 20\text{ °C}$	1/h
$k_L a_T$	allgemeiner Belüftungskoeffizient bei Temperatur T	1/h
$(k_L a_T \Delta t)_m$	Produkt aus Belüftungskoeffizient und Fließdauer im Modell	-
$(k_L a_T \Delta t)_p$	Produkt aus Belüftungskoeffizient und Fließdauer im Prototyp	-
k_N	äquivalente Sandrauheit aus punktueller Mikrorauheit (Noppen)	m
k_s	Oberflächenrauheit	m
k_{st}	Manning-Strickler-Beiwert	m ^{1/3} /s
K	Makrorauheit der Stufen ($K = s \cdot \cos \phi$)	m
K', K^*	Integrationskonstante bei Luftgehaltsmodell für Gerinne-strömung nach CHANSON (1996)	-
K''	Integrationskonstante bei Luftgehaltsmodell für Übergangsströmung TRA2 und Gerinneströmung nach CHANSON & TOOMBES (2001)	-
K'''	Integrationskonstante bei Luftgehaltsmodell für Übergangsströmung TRA1 nach CHANSON & TOOMBES (2001)	-
K_{eff}	effektive Makrorauheit bei Überlagerung mit Mikrorauheit	m
K_N	Höhe der Mikrorauheitselemente (Noppen)	m
l_{dw}	Länge der Deckwalze bei Wechselsprung	m
l_s	Reichweite des Wasserstrahls bei Kaskadenströmung	m
L	Entfernung eines Fließquerschnitts von der Schuss-rinnenkrone	m
L_a	Länge des belüfteten Fließbereichs	m
L_B	mittlerer Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Blasen	m
L_i	Entfernung des Selbstbelüftungspunkts von Schuss-rinnenkrone	m
L_s	Stufenlänge entlang des Pseudo-Bodens	m
L_u	Entfernung des gleichförmigen Fließbereichs von Schuss-rinnenkrone	m

Zeichen	Benennung	Einheit
m	Formkorrekturfaktor bei der Bestimmung von D_H an nicht kreisförmigen Querschnitten nach SCHRÖDER (1990)	-
\tilde{m}	Beiwert zur Berücksichtigung der Geometrie eines punktuellen Rauheitselements nach SCHRÖDER (1990)	-
Mo	Mortonzahl	-
n	reziproker Exponent bei dimensionsloser Geschwindigkeitsverteilung	-
n_G	Koordinate lotrecht zur Grenzfläche zwischen Wasser und Luft	m
N	Gesamtstufenzahl ($N = H_{dam}/s$)	-
N_B	Gesamtblasenzahl während einer Messung	-
N_i	Stufe des Selbstbelüftungspunkts ($N_i = \lceil H_{dam,i}/s \rceil$)	-
N_u	Stufe des Eintritts des Normalabflusses ($N_u = \lceil H_{dam,u}/s \rceil$)	-
p	atmosphärischen Druck	hPa
p^*	atmosphärischen Druck während Absorptionsmessung	hPa
$P(j)$	Koeffizient zur Bestimmung der Belüftungseffizienz der Stufe j	-
P_e	Elastizitätskraft	kN
P_g	Schwerkraft	kN
P_i	Trägheitskraft	kN
P_p	Druckkraft	kN
P_v	Zähigkeitskraft	kN
P_σ	Oberflächenspannungskraft	kN
q_w	spezifischer Reinwasserdurchfluss	m ² /s
Q_w	absoluter Reinwasserdurchfluss	m ³ /s
r, r_{20}	Verhältnis der Sauerstoffdefizite von Ober- und Unterwasser (bei $T = 20$ °C)	-
r_m, r_p	Verhältnis der Sauerstoffdefizite von Ober- und Unterwasser im Modell/Prototyp	-
R	reziproke Expansionsrate der Scherschicht am Pseudo-Boden nach BRATTBERG & CHANSON (1998)	-
Re	Reynoldszahl	-
s	Stufenhöhe	m
s_B	Blasensehnenlänge	m
s_T	Tropfensehnenlänge	m
S	Salzgehalt	g/kg
$SOTR_R$	volumenbezogene Sauerstoffzufuhr für Standardbedingungen ($T = 20$ °C und $p = 1.013$ hPa)	g/(m ³ h)
t	Stufenlänge ($t = s / \tan \phi$)	m
t_s	Zeitpunkt einer Messung	s
$t_{s,Luft}$	Dauer des Aufenthalts der Messsonde in Luft	s
t_{ow}	Zeitpunkt, an dem sich ein Wasserpartikel an der Schussrinnenkrone befindet	s
t_{uw}	Zeitpunkt, an dem sich ein Wasserpartikel am Schussrinnenende befindet	s
T	Wassertemperatur	°C
T_B	Blasenperiode ($T_B = 1/F_B$)	s

Zeichen	Benennung	Einheit
T_s	gesamte Messdauer	s
Tu	Turbulenzgrad ($Tu = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{w,i}^2}}{\bar{u}_w} = \frac{u'}{\bar{u}_w}$)	-
u	advective Transportgeschwindigkeit in Fließrichtung	m/s
u'	turbulenter Geschwindigkeitsanteil in Fließrichtung	m/s
$u_{1,uw}$	Fließgeschwindigkeit vor Wechselsprung auf der letzten Stufe bei Kaskadenströmung	m/s
u_m	Fließgeschwindigkeit des Wasser-Luft-Gemischs	m/s
\bar{u}_m	mittlere Fließgeschwindigkeit des Wasser-Luft-Gemischs	m/s
$u_{m,90}$	Fließgeschwindigkeit bei h_{90}	m/s
u_{max}	maximale Fließgeschwindigkeit in Längsrichtung an einem Querschnitt	m/s
u_w	Reinwasserfließgeschwindigkeit	m/s
\bar{u}_w	mittlere Reinwasserfließgeschwindigkeit	m/s
$u_{w,0}$	Fließgeschwindigkeit im Zulaufkanal	m/s
$\bar{u}_{w,ges}$	mittlere Reinwasserfließgeschwindigkeit auf der Strecke L_a	m/s
U	dimensionslose Fließgeschwindigkeit ($U = u_m / u_{m,90}$)	-
U_s	elektrische Spannung	V
$U_{s,high}$	oberes Spannungsquantil bei Digitalisierung der Gemischabflussmessungen	V
$U_{s,low}$	unteres Spannungsquantil bei Digitalisierung der Gemischabflussmessungen	V
U_w	benetzter Umfang ($U_w = 2 \cdot h_w + b$) an einem Fließquerschnitt	m
v	Koeffizient zur Druckkorrektur der Sauerstoffsättigungskonzentration $C_{S,St,T}$	-
V	Volumen	m ³
V_{BW}	Gesamtvolumen des zu einem Zeitpunkt auf dem Bauwerk befindlichen Wasser-Luft-Gemischs	m ³
V_{Luft}	Gesamtvolumen der zu einem Zeitpunkt eingetragenen Luft auf dem Bauwerk	m ³
V_{WK}	Volumen des Wasserkreislaufs	m ³
w	Fließgeschwindigkeit senkrecht zum Pseudo-Boden	m/s
w'	turbulenter senkrecht zur Oberfläche gerichteter Geschwindigkeitsanteil	m/s
w_B	Blasenauftriebsgeschwindigkeit	m/s
$w_{B,\perp}$	senkrecht zur Wasseroberfläche gerichteter Anteil der Blasenauftriebsgeschwindigkeit	m/s
$w_{B,m}$	Blasenauftriebsgeschwindigkeit in einem Wasser-Luft-Gemisch ohne hydrostatische Druckverteilung	m/s
w_k	Abstand zweier punktueller Rauheitselemente quer zur Fließrichtung	m
w_T	Fallgeschwindigkeit eines Wassertropfens	m/s
We	Weberzahl	-
We_s	Stufen-Weberzahl	-
x, x_j	Koordinate eines Querschnitts (j) in Fließrichtung	m
x'	dimensionslose Entfernung zwischen zwei Stufenecken entlang des Pseudo-Bodens ($x' = x / L_s$)	-

Zeichen	Benennung	Einheit
X'	dimensionslose Entfernung eines Fließquerschnitts zum Selbstbelüftungspunkt ($X' = (L - L_i)/h_i$)	-
y	Koordinate quer zur Fließrichtung	m
z	Koordinate senkrecht zum Pseudo-Boden (Ursprung am Pseudo-Boden)	m
Z	dimensionslose Fließtiefe ($Z = z/h_{90}$)	-
Z_0	obere dimensionslose Grenze der Potenzverteilung der Fließgeschwindigkeiten ($U(Z \geq Z_0) = 1$)	-
α	Geschwindigkeitshöhenausgleichsbeiwert	-
α'	Formkorrekturfaktor für dimensionslose Blasenfrequenzverteilungen nach TOOMBES (2002)	-
β	Integrationskonstante bei Luftgehaltsmodell nach WOOD (1984)	-
β'	Korrekturfaktor für Variation von λ_w und λ_a bei dimensionsloser Blasenfrequenzverteilung nach TOOMBES (2002)	-
γ	Integrationskonstante bei Luftgehaltsmodell nach WOOD (1984)	-
γ_a, γ_w	Wichte von Luft bzw. Wasser ($\gamma_{a/w} = \rho_{w/w} \cdot g$)	kN/m ³
δ	Koeffizient zur Bestimmung der Restenergie bei Kaskadenströmung nach CHAMANI & RAJARATNAM (1994)	-
$\Delta C_{L,1-2}$	Zuwachs der Sauerstoffkonzentration zwischen zwei Querschnitten 1 und 2 mit dem Abstand Δx_{1-2}	mg/l, %
ΔH	dissipierte Energiehöhe	m
Δt	Fließdauer eines Wasserpartikels von Schussrinnenkrone bis Bauwerksende ($\Delta t = t_{uw} - t_{ow}$)	s
Δt_s	Zeitversatz zweier Messpunkte oder -signale	s
ΔU_s	Bandbreite zwischen oberen und unteren Schwellenwert bei Digitalisierung der Gemischabflussmessungen ($\Delta U_s = U_{s,high} - U_{s,low}$)	V
Δx_{1-2}	Abstand zwischen zwei Querschnitten 1 und 2 in Fließrichtung	m
Δx_s	Längsabstand der Elektroden der Nadelsonde	mm
Δy_s	seitlicher Abstand der Elektroden der Nadelsonde	mm
Δz	Auflösung des Messrasters bei Luftgehaltsmessung	m
Δz_{max}	maximale Schrittweite im Messraster bei Luftgehaltsmessung	m
ϵ	konstanter Diffusionskoeffizient bei Luftgehaltsmodell nach WOOD (1984)	m ² /s
η	Rauheitskennzahl nach HAGER (1992)	m ^{-1/3} s
θ	Aufprallwinkel des Wasserstrahls bei Kaskadenströmung	°
κ	Kármán-Konstante ($\kappa \approx 0,4$)	-
κ_s	spezifische Leitfähigkeit	$\mu\text{S}/\text{cm}$
λ	Koeffizient bei Luftgehaltsmodell für Übergangsströmung TRA1 nach CHANSON & TOOMBES (2001)	-
λ_a, λ_w	Längenskalen der Luft- bzw. Wasserelemente in Blasenfrequenzverteilung nach TOOMBES (2002)	m

Zeichen	Benennung	Einheit
Λ	Modellmaßstab	-
μ_a, μ_w	dynamische Viskosität von Luft bzw. Wasser	Ns/m ²
ν_a, ν_w	kinematische Viskosität von Luft bzw. Wasser ($\nu_{a/w} = \mu_{a/w} / \rho_{a/wa}$)	m ² /s
ζ	Koeffizient zur Bestimmung der Reinwasserabflusstiefe im ungleichförmigen Fließbereich nach MATOS (2000C)	-
ρ_a, ρ_w	Dichte von Wasser bzw. Luft	t/m ³
σ	Oberflächenspannung zwischen Wasser und Luft	N/m
τ, τ_b	Schubspannung (am Pseudo-Boden)	kN/m ²
ϕ	Längsneigungswinkel des Bauwerks	°
ϕ_k	Rauheitsdichte punktueller Formwiderstände nach SCHRÖDER (1990) ($\phi_k = A_k / a_k \cdot w_k$)	-
ω	charakteristische Größe zur Beschreibung der Variation von β' bei dimensionsloser Blasenfrequenzverteilung nach TOOMBES (2002)	-