

Denitrifikation als Senke von N₂O-Emissionen bei der Teilstrombehandlung

Modellerweiterung und -anwendung

Von der

Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Benjamin Vogel

geboren am 20.09.1984

2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	viii
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	x
1 Einleitung	1
1.1 Thematische Einführung	1
1.2 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	2
2 Stand des Wissens	4
2.1 Prozesse und N ₂ O-Bildungspfade der Stickstoffelimination	4
2.1.1 Nitrifikation	4
2.1.2 Denitrifikation	7
2.1.3 Anaerobe Ammoniumoxidation	8
2.2 N ₂ O-Bildung und -Akkumulation bei der Denitrifikation	9
2.2.1 Stoffwechsel der Denitrifikanten	9
2.2.2 Einflussfaktoren auf die N ₂ O-Bildung/-Akkumulation	11
2.3 N ₂ O-Emission	13
2.4 Mathematische Modellierung biologischer Umsatzprozesse	15
2.4.1 Kinetik enzymkatalysierter Reaktionen (Monod-Kinetik)	16
2.4.2 Konventionelle mathematische Modelle	18
2.4.3 Existierende Modellansätze zur Abbildung von N ₂ O	21
3 Zielsetzungen für die Erweiterung des biologischen Modells	22
3.1 ASM1 als Basismodell für die Modellerweiterung	22
3.2 Erweiterung des ASM1 zur Abbildung der 3-stufigen Denitrifikation	23
3.3 Erweiterung des ASM1 zur Abbildung der 2-stufigen Nitrifikation	24
4 Material und Methoden	27
4.1 Analytik und verwendete Chemikalien	27
4.1.1 Standardanalytik und online-Messtechnik	27
4.1.2 Fluoreszenz in situ Hybridisierung (FISH)	29
4.1.3 Stammlösungen und eingesetzte Chemikalien	29
4.1.4 N ₂ O-Sensoren	30
4.2 Durchführung der Laborversuche und großtechnischer Messungen	32
4.2.1 Durchführung diskontinuierlicher Versuche (Batchtests)	32
4.2.2 Durchführung der kontinuierlichen Langzeitversuche	34
4.2.3 Equipment für großtechnische Messungen	35
4.2.3.1 Messung im Bypass	35

4.2.3.2	Messung direkt im Becken	37
4.2.3.3	Messung mittels Gashaube	38
4.3	Ermittlung der kinetischen Parameter und der Einflussfaktoren auf die N_2O -Akkumulation bei der Denitrifikation	39
4.3.1	Ermittlung der maximalen Wachstumsraten	39
4.3.2	Ermittlung der spezifischen Umsatzraten	41
4.3.3	Ermittlung der stöchiometrischen Koeffizienten	43
4.3.4	Ermittlung der Halbsättigungskonstanten	43
4.3.5	Untersuchte Einflussgrößen auf die N_2O -Akkumulation	44
4.4	Betrachtete großtechnische Anlagen	46
4.4.1	Prozesswasserbehandlung Potsdam	46
4.4.2	Prozesswasserbehandlung Rodgau	47
4.4.3	Prozesswasserbehandlung Rheda-Wiedenbrück	49
5	Messergebnisse	51
5.1	Messergebnisse der Laborversuche	51
5.1.1	Spezifische Umsatzraten der einzelnen Teilschritte der Denitrifikation	51
5.1.2	Halbsättigungskonstanten der Teilprozesse	54
5.1.3	Wachstumsraten und Ertragskoeffizienten für die NO_3-N und NO_2-N -Reduktion	54
5.1.4	Einflussfaktoren auf die Zwischenproduktakkumulation	57
5.1.4.1	Einfluss der Kohlenstoffquelle und des CSB/N-Verhältnis	57
5.1.4.2	Einfluss von Nitrit und salpetriger Säure	59
5.1.4.3	Einfluss von Nitrat auf die Nitrit-Anreicherung	63
5.1.4.4	Einfluss von Sauerstoff	64
5.2	Messergebnisse der großtechnischen Messungen	66
5.2.1	PWB Potsdam	66
5.2.2	PWB Rodgau	70
5.2.3	PWB Rheda-Wiedenbrück	74
5.3	Zusammenfassung der Messergebnisse	76
5.3.1	Überblick der relevanten Prozessgrößen	76
5.3.2	Gegenüberstellung der großtechnischen Messungen	77
6	Modellierung und Simulation	79
6.1	Aufbau der technischen Anlagenmodelle	79
6.1.1	Konverter und externe Variablen	79
6.1.2	Technisches Anlagenmodell der Batchtest	81
6.1.3	Technisches Anlagenmodell der kontinuierlichen SBR-Versuchsanlage	83
6.1.4	Technisches Anlagenmodell der PWB Rodgau	84
6.1.5	Technisches Anlagenmodell der PWB Potsdam	87
6.1.6	Technisches Anlagenmodell der PWB Rheda-Wiedenbrück	89

6.2 Weiterentwicklung des biologischen Modells	91
6.2.1 Modellansatz der 3-stufige Denitrifikation im <i>ASM1_N2O</i>	91
6.2.2 Modellansatz der 2-stufigen Nitrifikation im <i>ASM1_N2O</i>	94
6.2.3 Erweitertes Gesamtmodell und kinetische Parameter	98
6.3 Kalibrierung und Validierung des Modells	102
6.3.1 Kalibrierung des biologischen Modells	102
6.3.2 Validierung des kalibrierten Modells und Beurteilung der Modellgüte	105
6.3.2.1 Validierung mit Ergebnissen der Batchtests	106
6.3.2.2 Validierung mit Ergebnissen der PWB Rodgau	113
6.3.2.3 Validierung mit Ergebnissen der PWB Potsdam	116
6.3.2.4 Validierung mit Ergebnissen der PWB Rheda-Wiedenbrück	118
7 Reduzierung der N₂O-Emission durch Ausnutzung des Denitrifikationspotentials	120
8 Zusammenfassung	123
9 Literaturverzeichnis	127
Anhang A	A