

Stickstoffkreislauf im Wasser

Stickstoffumsetzungen in natürlichen Gewässern,
in der Abwasserreinigung und Wasserversorgung

Herausgegeben von:

G. Rheinheimer, W Hegemann,
J. Raff, I. Sekoulov

Mit 175 Bildern und 42 Tabellen

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1988

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Verzeichnis der Autoren	VI

I. Teil

Stickstoffumsetzungen in natürlichen Gewässern

1.	<i>Einführung</i>	1
2.	<i>Taxonomie der beteiligten Organismen</i>	4
2.1	Stickstoff-Fixierung:	4
2.1.1	Diazotrophe (N ₂ -fixierende) Prokaryonten	4
2.1.1.1	Aerobe heterötrophe Stickstoff-Fixierer.	8
2.1.1.2	Mikroaerophile heterötrophe Stickstoff-Fixierer.....	13
2.1.1.3	Fakultativ anaerobe Stickstoff-Fixierer.	14
2.1.1.4	Obligat anaerobe Stickstoff-Fixierer	16
2.1.1.5	Cyanobakterien	17
2.2	Ammonifikation und NH ₄ -Assimilation	23
2.2.1	Ammonifikation	23
2.2.2	NH ₄ ⁺ -Assimilation	24
2.3	Nitrifikation	24
2.3.1	Nitrifizierende Bakterien	25
2.3.1.1	Lithotrophe Ammoniakoxidanten	26
2.3.1.2	Lithotrophe Nitritoxidanten	32
2.4	Nitratreduktion	38
2.4.1	Nitratassimilation	38
2.4.2	Nitratatmung	38
2.4.2.1	Denitrifikation	38
2.4.2.2	Nitratammonifikation	42
3.	<i>Stoffwechsel und Wachstumskinetik</i>	44
3.1	Stickstoff-Fixierung	44
3.1.1	Wachstum diazotropher Stämme in Reinkulturen	44
3.1.2	Nitrogenase: Struktur und Funktion	46
3.1.3	Energetik der N ₂ -Fixierung	48
3.1.4	Sauerstoff-Schutzmechanismen.....	50
3.1.5	Genetik der N ₂ -Fixierung und Ammonium- assimilation	53
3.2	Ammonifikation und NH ₄ -Assimilation	54
3.2.1	Ammonifikation.....	54
3.2.2	NH ₄ -Assimilation"	56
3.3	Nitrifikation	63

3.3.1	Anreicherung und Isolierung	63
3.3.2	Wachstum und Vermehrung	64
3.3.2.1	Lithotrophe Ammoniakoxidanten	64
3.3.2.2	Lithotrophe Nitritoxidanten	67
3.3.2.3	Heterotrophe Nitrifikation	69
3.3.3	Biochemie des Stoffwechsels	70
3.3.3.1	Lithotrophe Ammoniakoxidanten	71
3.3.3.2	Lithotrophe Nitritoxidanten	73
3.3.3.3	Heterotrophe Nitrifikation	76
3.4	Nitratreduktion	76
3.4.1	Assimilatorische Nitratreduktion	78
3.4.2	Nitratatmung	85
3.4.2.1	Denitrifikation	88
3.4.2.2	Nitratammonifikation	96
4.	<i>Einflußfaktoren auf die Stickstoffumwandlungen</i>	101
4.1	Stickstoff-Fixierung	101
4.1.1	Temperatur	101
4.1.2	Licht	102
4.1.3	Organischer Kohlenstoff	102
4.1.4	Stickstoff	103
4.1.5	Sauerstoff	106
4.1.6	Hemmstoffe	107
4.2	Ammonifikation	107
4.2.1	Temperatur	107
4.2.2	Stickstoff	108
4.2.3	Weitere Einflußfaktoren	108
4.3	Nitrifikation	109
4.3.1	Temperatur	109
4.3.2	Turbulenz	110
4.3.3	Licht	111
4.3.4	pH-Wert	111
4.3.5	Sauerstoff	113
4.3.6	Organischer Kohlenstoff	114
4.3.7	Hemmstoffe	115
4.4	Nitratreduktion	118
4.4.1	Temperatur	118
4.4.2	pH-Wert	120
4.4.3	Sauerstoff	120
4.4.4	Organische Kohlenstoffquelle	121
4.4.5	Stickstoff	122
4.4.6	Hemmstoffe	123
5.	<i>Ökologische Aspekte der Stickstoffumsetzungen</i>	126
5.1	Seen	126

5.1.1	Stickstoff-Fixierung	126
5.1.2	Ammonifikation	128
5.1.3	Nitrifikation	128
5.1.4	Nitratreduktion	129
5.2.	Flüsse	131
5.2.1	Stickstoff-Fixierung	131
5.2.2	Ammonifikation	132
• 5.2.3	Nitrifikation	134
5.2.4	Nitratreduktion	138
5.3	Küstengewässer	140
5.3.1	Stickstoff-Fixierung	141
5.3.2	Ammonifikation	142
5.3.3	Nitrifikation	143
5.3.4	Nitratreduktion	146
5.4	Wechselbeziehungen zwischen den Stickstoff- umsetzungen in den Gewässern	149
6.	<i>Modelle zur Erfassung der Stickstoffumsetzungen in Fließgewässern</i>	152
6.1	Entwicklung und Anwendung der Modellrechnungen	153
6.2	Wahl des geeigneten Modellansatzes	154
6.2.1	Ziel der Modellanwendung	154
6.2.2	Untersuchungsabschnitt und seine Rand- bedingungen	155
6.2.3	Verfügbares Datenmaterial	155
6.3	Lösungswege verschiedener Modelle	155
6.3.1	Prognostisches Modell Neckar	156
6.3.2	Modell Böhne/Pöppinghaus	156
6.3.3	Modell Wolf	157
6.3.4	Biozönotisches Modell	158
6.3.5	Vergleich der mathematischen Modellansätze	158
6.4	Schlußbemerkung	162
	Literaturverzeichnis	163

II. Teil

Nitrifikation und Denitrifikation in der

Abwassertechnik

1.	<i>Allgemeines</i>	183
1.1	Stickstoffverbindungen im Abwasser ;	183
1.2	Ziel und Zweck der Stickstoffelimination	184
2.	<i>Mikrobiologische Grundlagen</i>	187
2.1	Übersicht	187

2.2	Mikrobielle Lebensgemeinschaften in Kläranlagen	190
2.3	Mechanismen der Biofilm- und Flockenbildung	198
2.4	Stöchiometrische Betrachtungen	202
2.5	Reaktionskinetische Betrachtungen	209
2.6	Betrachtungen zur Reaktionstechnik	217
3.	<i>Technische Anwendung der Nitrifikation und Denitrifikation</i>	222
3.1	Biofilmverfahren	222
3.1.1	Tropfkörper	224
3.1.1.1	Verfahrensbeschreibung und betriebliche Erfahrungen	224
3.1.1.2	Bemessung	233
3.1.2	Scheibentauchkörper zur Nitrifikation	233
3.1.2.1	Verfahrensbeschreibung	233
3.1.2.2	Bemessung	239
3.1.2.3	Konstruktion, betriebliche Erfahrung	242
3.1.2.4	Kosten	244
3.1.2.5	Denitrifikation	246
3.1.3	Sonstige Festbettreaktoren	248
3.1.3.1	Überstaute Festbettreaktoren	248
3.1.3.2	Schwebebettreaktoren	257
3.1.3.3	Wirbelbett- und Fließbettreaktoren	260
3.1.3.4	Sand- und Aktivkohlefilter	260
3.2	Belebungsverfahren	260
3.2.1	Verfahren mit kontinuierlicher Beschickung	261
3.2.1.1	Kohlenstoffabbau und Nitrifikation in einer Lebensgemeinschaft	261
3.2.1.1.1	Verfahrensbeschreibung	261
3.2.1.1.2	Bemessung - Ermittlung des Volumens	263
3.2.1.1.3	Bemessung - Ermittlung der Sauerstoffzufuhr	269
3.2.1.1.4	Konstruktion und betriebliche Erfahrung	273
3.2.1.2	Denitrifikation als zusätzliche Aufgabe	274
3.2.1.2.1	Nachgeschaltete Denitrifikation	274
3.2.1.2.2	Simultane Denitrifikation	278
3.2.1.2.3	Vorgeschaltete Denitrifikation	292
3.2.2	Intermittierend beschickte Belebungsanlagen	310
3.2.2.1	Übersicht }	310
3.2.2.2	Kohlenstoffabbau und Nitrifikation	314
3.2.2.3	Denitrifikation als zusätzliche Aufgabe	318
3.2.3	Zweistufige Belebungsanlagen	323
3.2.3.1	Verfahrensbeschreibung	323
3.2.3.2	Bemessung	324

3.2.3.3	Konstruktion und betriebliche Erfahrung	330
3.2.3.4	Kosten	331
	Literaturverzeichnis	332

ffl. Teil

Entfernung von Ammonium und Nitrat bei der Wasser-		
aufbereitung		337
/.	<i>Allgemeines</i>	337
1.1	Herkunft von Nitrat in Grund- und Oberflächen-	
	wässern	337
1.2	Herkunft von Ammonium in Grund- und Oberflächen-	
	wässern	340
1.3	Zweck der Stickstoffentfernung bei der Trinkwasser-	
	aufbereitung	342
1.3.1	Hygienische Relevanz von Nitrat	342
1.3.2	Bedeutung von Ammonium für die Trinkwasserqualität	345
2.	<i>Verfahren zur Entfernung von Nitrat</i>	347
2.1	Physikalisch-chemische Verfahren	348
2.1.1	Umkehrosmose	348
2.1.2	Elektrodialyse	351
2.1.3	Ionenaustauschverfahren	353
2.1.3.1	Anionenaustausch	354
2.1.3.2	Teilentsalzungsverfahren	355
2.2	Biologische Verfahren	357
2.2.1	Grundlagen der Denitrifikation	357
2.2.2	Verfahrensschema	359
2.2.3	DENIPOR-Verfahren	361
2.2.4	NITRAZUR-Verfahren	361
2.2.5	OTV-Verfahren	362
2.2.6	Aktivkohleverfahren mit aerober Untergrundpassage	362
2.2.7	DENITROPUR-Verfahren	363
2.3	Kosten der verschiedenen Verfahren	364
3.	<i>Verfahren zur Entfernung von Ammonium</i>	366
3.1	Chemische Verfahren	366
3.1.1	Chlorung	366
3.1.1.1	Reaktion von Chlor mit Ammonium bzw. mit Ammoniak	366
3.1.1.2	Chlorzehrungskurve	369
3.1.1.3	Nebenreaktionen bei der Chlorung	370
3.1.1.4	Beispiele für Verfahrenskombinationen mit Knick-	
	punkchlorung	371
3.1.2	Oxidation mit Ozon	373

3.2	Biologische Verfahren.....	374
3.2.1	Grundlagen der Nitrifikation.....	374
3.2.2	Verfahrenstechnik der Nitrifikation.....	377
3.2.3	Beispiele für Verfahren zur biologischen Ammonium- entfernung.....	380
3.2.3.1	Das Wasserwerk Dohne.....	380
3.2.3.2	Das Wasserwerk Langenau.....	380
3.2.3.3	Ammoniumentfernung mit Trockenfiltern.....	381
3.2.3.4	Ammoniumentfernung in Wirbelschichtreaktoren.....	382
3.2.3.5	Nitrifikation im Untergrund.....	383
3.3	Ammoniumentfernung durch Strippen.....	384
3.4	Ammoniumentfernung durch selektiven Ionenaustausch.....	385
3.5	Diskussion und Kosten der Verfahren.....	386
	Literaturverzeichnis.....	388
	Stichwortverzeichnis.....	391