

Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter Flüsse am Beispiel des Neckars – Analysen, Experimente, Simulationen –

Von der Fakultät für Bauingenieur- und Umweltingenieurwissenschaften der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Ingo Haag

aus Esslingen am Neckar

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Westrich

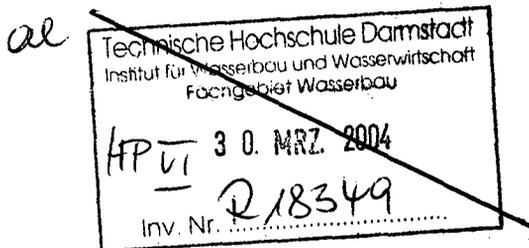
Mitberichter:

Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Förstner

Prof. Dr. rer. nat. Jörg W. Metzger

Tag der mündlichen Prüfung:

27. Februar 2003



Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart

2003

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	I
Danksagung	II
Inhaltsverzeichnis	III
Verzeichnis der Abbildungen	VI
Verzeichnis der Tabellen	XI
Nomenklatur	XIV
Zusammenfassung	XVIII
Summary	XX
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	1
2 Grundlagen des Stoffhaushalts in staugeregelten Flüssen	3
2.1 Einführung	3
2.2 Strömung und Transport	3
2.2.1 Strömung	3
2.2.2 Ausbreitung und Transport	4
2.3 Gewässerinterne Stoffumsetzungen	5
2.3.1 Grundlagen der gewässerinternen Stoffumsetzungen	5
2.3.2 Abbau toter organischer Substanz und Stickstoffkreislauf	10
2.3.3 Phytoplankton	15
2.4 Gasaustausch mit der Atmosphäre	20
2.4.1 Gasaustausch über die freie Wasseroberfläche	20
2.4.2 Gasaustausch beim Wehrüberfall	28
2.4.2 Gasaustausch bei der Turbinenbelüftung	34
2.5 Stoffaustausch mit dem Sediment	35
2.5.1 Empirische Ansätze zur Sauerstoffzehrung des Sediments	35
2.5.2 Für den Stoffaustausch maßgebende Prozesse im Sediment	35
2.5.3 Einfluss der wasserseitigen Grenzschicht auf den Stoffaustausch	40
2.5.4 Quantitative Bedeutung der Einflussfaktoren für den Stoffaustausch	43
2.5.5 Partikelgebundener Stoffaustausch	44
2.6 Anthropogene Beeinflussung des Stoffhaushalts	45
2.6.1 Stoff- und Wärmeeintrag	45
2.6.2 Auswirkungen der Stauregulierung auf den Stoffhaushalt	47
3 Untersuchungsgebiet	50
3.1 Grundlegendes	50
3.2 Hydrologie	51
3.3 Gewässergütedaten	53
4 Historische Entwicklung des Sauerstoffhaushalts im Neckar	54
4.1 Motivation	54
4.2 Datengrundlage	54
4.3 Statistische Methoden	55
4.4 Ergebnisse und Diskussion	56
4.4.1 Entwicklung der Abwasserreinigung	56
4.4.2 Sauerstoff	58
4.4.3 Zehrstoffe, Nährstoffe und Chlorophyll	64
4.4.4 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse	67

5 Aktueller Zustand des Stoffhaushalts im Neckar	69
5.1 Einleitung	69
5.2 Allgemeine Charakterisierung des Stoffhaushalts	69
5.3 Identifikation und Bewertung der maßgeblichen Prozesse	81
5.3.1 Methodik	81
5.3.2 Ergebnisse und Diskussion	82
5.4 Wesentliche Folgerungen aus der empirischen Stoffhaushaltsanalyse	91
6 Untersuchungen zum Sauerstoffaustausch mit der Atmosphäre	92
6.1 Motivation und Zielsetzung	92
6.2 Versuchsbeschreibung	92
6.3 Gasaustausch auf der Fließstrecke	94
6.3.1 Auswertungsmethoden	94
6.3.2 Ergebnisse und Diskussion	95
6.4 Gasaustausch beim freien Wehrüberfall	101
6.4.1 Bewertung von Wehrbelüftungsformeln anhand von Literaturdaten	101
6.4.2 Ein mechanistisches Modell für den Gasaustausch beim Wehrüberfall	104
6.4.3 Der Gasaustausch am Wehr Esslingen	113
7 Untersuchungen zum Stoffaustausch mit dem Sediment	120
7.1 Motivation	120
7.2 Experimentelle Methoden	120
7.2.1 Laborversuche zur Bedeutung des wasserseitigen Widerstands	120
7.2.2 In situ-Messungen des Stoffaustauschs	123
7.3 Simulationsmodell für den Stoffaustausch mit dem Sediment	125
7.4 Ergebnisse und Diskussion	127
7.4.1 Bedeutung des wasserseitigen Widerstands für den Stoffaustausch	127
7.4.2 Begleitende Simulation zu den in situ-Messungen	128
7.4.3 Ergebnisse der in situ-Messungen	132
7.4.4 Diskussion der in situ-Messungen	138
8 Entwicklung, Kalibrierung und Bewertung der Simulationsmodelle	143
8.1 Einleitung	143
8.1.1 Problemstellung	143
8.1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	143
8.2 Modellgebiet	145
8.3 Das Basismodell zur Simulation des Stoffhaushalts: BWQM	146
8.3.1 Strömung und Transport im BWQM	146
8.3.2 Stoffhaushalt im BWQM	146
8.3.3 Sensitivitätsanalyse, Parameteridentifikation und Kalibrierung des BWQM	151
8.3.4 Überprüfung und Bewertung des BWQM	160
8.4 Das um Primärkonsumenten erweiterte Modell: EWQM	164
8.4.1 Grundlegendes	164
8.4.2 Stoffhaushalt im EWQM	165
8.4.3 Wahl der Parameterwerte im EWQM	167
8.4.4 Simulationsergebnisse mit dem EWQM	170
8.5 Bewertender Vergleich der Simulationsmodelle	173

9 Modellgestützte Systemanalyse	175
9.1 Grundlegendes	175
9.2 Sauerstoffhaushalt und Phytoplankton	175
9.2.1 Steuergrößen der Sauerstoffkonzentrationen	175
9.2.2 Steuergrößen der Phytoplanktondynamik	179
9.3 Nährstoffretention	185
9.3.1 Motivation	185
9.3.2 Ergebnisse und Diskussion	185
10 Modellgestützte Prognosen zur Verbesserung des Sauerstoffhaushalts	189
10.1 Mindestanforderungen an den Sauerstoffgehalt	189
10.2 Grundlegende Szenarien	190
10.3 Nährstofflimitierung	193
10.3.1 Allgemeines	193
10.3.2 Simulationsergebnisse	193
10.3.3 Diskussion	198
10.4 Zehrstoffemissionen auf der Modellstrecke	198
10.5 Veränderung der Stauziele	201
10.6 Belüftungsmaßnahmen und deren Optimierung	203
10.6.1 Sauerstoffeintragspotenziale durch Turbinen- und Wehrbelüftung	203
10.6.2 Ökologisch-ökonomische Optimierung von Turbinen- und Wehrbelüftung	205
10.6.3 Bewertung von Belüftungsstrategien anhand von Simulationsszenarien	208
10.6.4 Diskussion der Belüftungsmaßnahmen	212
11 Schlussfolgerungen und Ausblick	214
11.1 Fallspezifische Erkenntnisse	214
11.2 Gewässergütebezogene Bewirtschaftungsplanung	215
11.3 Prozessbasierte Stoffhaushaltssimulationen	217
11.3.1 Wahl des Modellkonzepts	217
11.3.2 Messprogramme zur verbesserten Parameteridentifikation und Kalibrierung	218
11.3.3 Operationeller Einsatz von Stoffhaushaltsmodellen	219
11.3.4 Langfristige Maßnahmenplanung	220
Literaturverzeichnis	222

Anhang

A Simulationsmodell für Stoffumsatz und Transport im Sediment	238
B Basic Water Quality Model (BWQM)	243
C Extended Water Quality Model (EWQM)	248