

# Güteorientierte Abflußsteuerung in Bremen-Linkes-Weserufer

## Abschlußbericht



Vahrenwalder Str. 7  
30165 Hannover

Tel.: 0511-9357 250  
Fax: 0511-9357 100

# Güteorientierte Abflußsteuerung in Bremen-Linkes-Weserufer

## Abschlußbericht Teil I

Ermittlung der Eignung der kontinuierlichen BSB-M3-Messung  
im Hauptpumpwerk - Linkes Weserufer - für eine  
güteorientierte Abflußsteuerung

Auftraggeber: Bremer Entsorgungsbetriebe, vertreten durch  
Herrn Dipl.-Ing. Albrecht (Projektleiter)  
Herrn Dipl.-Ing. Broll-Bickhardt

Bearbeitung: **ifs** Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH

Hannover, den 11.8.1994

  
Dipl.-Ing. M. Schütte

  
Dr.-Ing. M. Uhl  
Beratender Ingenieur



## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<b>Zusammenfassung</b>	3
<b>ABSCHLUSSBERICHT TEIL I</b>	
<b>1. Genauigkeit und Verzögerungseigenschaften des BSB-M3-Gerätes bei gleichbleibender Abwassermatrix</b>	
1.1 Literatur- und Firmenangaben zu den dynamischen Eigenschaften	9
1.1.1 Rechercheergebnisse	9
1.1.2 Funktionsfähigkeit des BIOX 1000 bei Mischwasserabfluß	9
1.1.3 Dynamisches Verhalten des BIOX 1000	12
1.1.4 Literaturverzeichnis zur Literaturrecherche	19
1.2 Bestimmung der Verzögerungsgleichung des Gerätes aus der Michaelis-Menten-Gleichung	20
1.3 Durchführung einer Versuchsserie zur Bestimmung der Genauigkeit und der Verzögerungseigenschaften des Gerätes	23
1.3.1 Kalibrierungen des BSB-M3-Gerätes	23
1.3.2 Dynamischer Test des BSB-M3-Gerätes am 2.8.1993	25
1.3.3 Dynamischer Test des BSB-M3-Gerätes am 10.9.1993	27
<b>2. Genauigkeit und Verzögerungseigenschaften des BSB-M3-Gerätes bei Mischwasserabfluß (veränderte Abwassermatrix)</b>	
2.1 Durchführung einer Regenwetterbeprobungskamagne zur Bestimmung der Genauigkeit und der Verzögerungseigenschaften des Gerätes	30
2.2 Ergebnisse der Regenwetterbeprobungen	31
2.3 Untersuchung zur Repräsentativität der gemessenen Güteparameter am Hauptpumpwerk -Linkes Weserufer-	40
<b>3. Ermittlung des Zusammenhang zwischen BSB und anderen Güteparametern - Untersuchung von Leitparametern</b>	43

**ABSCHLUSSBERICHT TEIL II**

Seite

<b>4. Entwicklung eines Notfallsteuerungskonzeptes</b>	
4.1 Allgemeine Zielsetzung des Vorhabens	61
4.1.1 Erweiterung des Steuerungskonzeptes	61
4.1.2 Schwierigkeiten der Gütemessungen	62
4.1.3 Vorteile der Gütebetrachtung	63
4.2 Die Betriebssicherheit	65
4.2.1 Charakterisierung eines Vorfalles	65
4.2.2 Steuerungstrategie zur Betriebsicherheit	65
4.3 Die Notfallstrategie	66
4.3.1 Erläuterung der Problematik	66
4.3.2 Charakterisierung einer Notfallsituation	67
4.3.2.1 Gütezustand im Kanal	67
4.3.2.2 Gütezustand auf der Kläranlage Seehausen	67
4.3.3 Implementierung	69
<b>5. Entwicklung eines Steuerungskonzeptes zur Vergleichmäßigung des Kläranlagenzuflusses bei Trockenwetter</b>	
5.1 Charakterisierung der Förderganglinie im HPWL	71
5.2 Implementierung der Vergleichmäßigungsstrategie	72
<b>6. Ermittlung des Steuerungspotentials für eine güteorientierte Steuerung bei Mischwasserabfluß</b>	
6.1 Einführung in die Problematik	75
6.2 Beschreibung des Entwässerungssystem Bremen-Linkes-Weserufer im Hinblick auf die Steuerung	78
6.3 Ergebnisse der Untersuchung zur Charakterisierung der der Gütesituation im Kanal Bremen-Linkes-Weserufer	83
6.4 Steuerungspotential für eine Gütesteuerung in Bremen-Linkes-Weserufer	85
<b>7. Verzeichnisse</b>	
7.1 Literaturverzeichnis	89
7.2 Verzeichnis der Bilder	92
7.3 Verzeichnis der Tabellen	94
7.4 Verzeichnis der Abkürzungen	95
7.5 Verzeichnis der Anlagen	96

**Zusammenfassung**

Im vorliegenden Bericht werden die Untersuchungen und die Ergebnisse des Projektes "Güteorientierte Abflußsteuerung" dargestellt, das im Auftrag der Bremer Entsorgungsbetriebe von der Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie im Zeitraum April 1993 bis Juli 1994 bearbeitet wurde.

Veranlassung des Projektes war die Untersuchung über die Möglichkeiten einer Einbeziehung von Gütemeßdaten in das Steuerungssystem Bremen-Linkes-Weserufer. Die derzeitige Steuerungsstrategie im Kanalnetz Bremen-Linkes-Weserufer ist hinsichtlich des Gewässerschutzes darauf ausgerichtet, eine Verminderung der entlasteten Mischwasservolumina zu erreichen. Für die Erhaltung bzw. Verbesserung des Vorfluterzustandes ist es jedoch erforderlich, daß die Mischwasserentlastungen nicht nur hinsichtlich der Wassermenge, sondern auch unter Einbeziehung der Güteaspekte betrachtet werden.

An der Hauptentlastungsstelle Hauptpumpwerk -Linkes Weserufer- werden zur Zeit drei Güteparameter im Schmutz- und Mischwasser kontinuierlich gemessen: pH-Wert, Leitfähigkeit, BSB-Konzentration. Daneben werden unmittelbar über der Wasseroberfläche im Pumpensumpf die H<sub>2</sub>S-Konzentration, der O<sub>2</sub>-Gehalt und Ex-Gas gemessen.

Die Berücksichtigung der Güteparameter im Expertensystem dient zum einen einer verbesserten Betriebssicherheit im Hauptpumpwerk -Linkes Weserufer-, zum anderen können durch die Kenntnisse der Abwasserbeschaffenheit Steuerungsaktionen zum Schutz von Kläranlage und Vorfluter in den automatischen Entscheidungsprozeß miteinbezogen werden.

Der vorliegende Abschlußbericht gliedert sich in zwei Teile entsprechend dem Auftrag der Bremer Entsorgungsbetriebe. Der erste Teil beschäftigt sich mit der Ermittlung der Eignung der kontinuierlichen BSB-M3-Messung im Hauptpumpwerk -Linkes Weserufer- (HPWL) für eine güteorientierte Steuerung. Im zweiten Teil wird das neu erarbeitete "Erweiterte Steuerungskonzept" dargestellt. Die Steuerungsstrategie wurde in den Bereichen Notfallstrategie und Vergleichmäßigung der Kläranlagenzläufe erweitert. Daneben wurde untersucht, welches Potential für eine güteorientierte Steuerung in Bremen-Linkes-Weserufer vorhanden ist.

In Kapitel 1 werden die Ergebnisse einer Literaturrecherche zum Genauigkeits- und Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes vorgestellt. Die theoretischen Grundlagen zur Funktionsweise des BSB-M3-Gerätes werden erläutert und die Ergebnisse einer Versuchsserie zum dynamischen Verhalten des BSB-M3-Gerätes bei gleichbleibender Abwassermatrix werden gezeigt.

Die Auswertung verschiedener Literaturquellen zum dynamischen Verhalten des BSB-M3-Gerätes ergibt Angaben zur Meßzeitverzögerung in einer Spannbreite von 8 bis 15 Minuten. Diese Verzögerungszeiten wurden in der Regel durch sog. Sprungversuche ermittelt. Bei mehreren dynamischen Tests des BSB-M3-Gerätes im HPWL, die nach dem gleichen Muster als Sprungversuche durchgeführt wurden, stimmten die Verzögerungszeiten von 12 Minuten bei Belastungszunahme mit den Angaben in der Literatur überein. Bei einer Belastungsabnahme weist das BSB-M3-Gerät im HPWL um ca. 9 Minuten größere Verzögerungszeiten auf.

Vergleichsmessungen zwischen BSB-M3 und BSB<sub>5</sub> wurden offensichtlich noch nicht durchgeführt oder nicht publiziert. Quantitative Angaben zur Genauigkeit der BSB-M3-Messung im praktischen Einsatz werden in der Literatur nicht gemacht, so daß die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes erstmalig Ergebnisse zu dieser Thematik liefern.

In Kapitel 2 werden die Ergebnisse der am HPWL durchgeführten Mischwasserbeprobungskampagnen dargestellt. Beprobte wurden 5 Niederschlagsereignisse indem aus der Zulaufleitung zum BSB-M3-Gerät Mischproben entnommen und als Referenzproben im Labor auf den BSB<sub>5</sub> analysiert wurden. Durch die zeitliche Zuordnung der BSB<sub>5</sub>-Werte zu den BSB-M3-Meßwerten lassen sich Angaben zum Genauigkeits- und Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes machen. Bei drei Mischwasserereignissen betragen die Verzögerungszeiten etwa 60 Minuten, bei den anderen beiden Ereignissen 35 Minuten bzw. 3 Minuten. Die Ergebnisse der dynamischen Tests konnten somit nicht bestätigt werden. Quantitativ werden die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen vom BSB-M3-Gerät richtig wiedergegeben.

Bezüglich der Genauigkeit der BSB-M3-Messung im HPWL kann demnach von einer korrekten und auch repräsentativen Messung der BSB-Konzentrationen ausgegangen werden, allerdings mit einer zeitlichen Verzögerung.

Für das Verzögerungsverhalten konnte bis dato keine Erklärung gefunden werden, auch nicht seitens der Herstellerfirma STIP. Aufgrund der Schwankungsbreite der Verzögerungszeiten kann kein einheitlicher Verzögerungsfaktor systematisiert werden. Dies wäre aber für den Einsatz des BSB-M3-Gerätes für Steuerungszwecke mindestens erforderlich. Mit Meßwertverzögerungen von ungefähr 60 Minuten wäre das BSB-M3-Gerät für on line Steuerungszwecke allerdings nicht geeignet. Daß eine quantitativ und zeitlich korrekte Messung offensichtlich möglich ist, zeigt die Beprobung mit der Meßzeitverzögerung von 3 Minuten.

Eine Untersuchung zur Repräsentativität der am HPWL im Pumpensumpf gemessenen Güteparameter BSB-M3, pH-Wert und Leitfähigkeit wird in Kapitel 2.3 beschrieben. Für alle drei Güteparameter wurde durch Vergleichsmessungen mit mobilen

Sonden und durch Beprobungen festgestellt, daß die vom Datenerfassungssystem registrierten Meßwerte die tatsächlich Verhältnissen im Pumpensumpf wiedergeben.

Während des Projektzeitraumes konnten hinsichtlich Gerätekalibrierungen und Betriebsstörungen des BSB-M3-Gerätes im HPWL einige Erfahrungen gesammelt werden. Die Gerätekalibrierung ist aufgrund der zu berücksichtigten Fehler bei der BSB-M3-Messung und bei den Laboranalysen der BSB<sub>5</sub>-Referenzproben mit einigen Ungenauigkeiten und Unsicherheiten behaftet. Eine Verbesserung dieser nicht zufriedenstellenden Situation läßt sich durch Einhaltung bestimmter Maßnahmen bei der Kalibrierung erreichen. Zum einen sollte die BSB-M3-Messung und BSB<sub>5</sub>-Analyse an Abwasserproben mit genau eingestellten Verdünnungsverhältnissen vorgenommen werden, um so die Laborergebnisse auf Plausibilität prüfen zu können. Die BSB-Analytik der Referenzproben sollte grundsätzlich nur an Labors mit besten Ergebnissen bei BSB-Ringtests vergeben werden. Zum anderen sollten die Referenzproben mehrfach analysiert werden. Die Ergebnisse sollten einem Ausreißertest unterzogen werden, wenn auffällige Abweichungen vorliegen.

Beim BSB-M3-Gerät traten im Projektzeitraum mehrfach Störungen auf, vor allem im Bereich der O<sub>2</sub>-Sonden. Eine regelmäßige, tägliche Inspektion des BSB-M3-Gerätes ist deshalb zur Gewährleistung eines reibungslosen Meßbetriebes gerade auch im Hinblick auf eine güteorientierte Abflußsteuerung notwendig.

Kapitel 3 faßt die Ergebnisse einer statistischen Untersuchung über die Eignung von Leitparametern für die Berechnung des BSB<sub>5</sub> zusammen. Als Leitparameter wurden die Leitfähigkeit und der CSB untersucht. Ausgewertet wurden für den Leitparameter Leitfähigkeit Trocken- und Regenwetterdaten des Zentralen Datenerfassungssystem im HPWL, für den Leitparameter CSB Daten einer Untersuchung am RÜB Bremen-Horn.

Eine Berechnung des BSB-M3 bzw. des BSB<sub>5</sub> mittels der Leitfähigkeit ist nach der durchgeführten Untersuchung bei Schmutzwasserabfluß überhaupt nicht, bei Mischwasserabfluß nur eingeschränkt bei Vorhandensein bestimmter Randbedingung möglich (keine Industrieleitungen, keine Einleitungen von Weserwasser in das Kanalnetz). Der Einsatz der Leitfähigkeit als Leitparameter ist daher auch nur zu rechtfertigen, wenn diese Einschränkungen berücksichtigt werden. In 50% aller untersuchten Fälle (Niederschlagsereignisse) waren Störeinflüsse durch Industrieleitungen oder Weserwasser vorhanden. Aber auch für die übrigen Mischwasserereignisse bleibt die Berechnung des BSB mittels der Leitfähigkeit immer mit Unsicherheiten behaftet, da die Spannbreite der zu berücksichtigenden Fehler bei der Berechnung relativ groß ist.

Im zweiten Teil des Abschlußberichtes wird das "Erweiterte Steuerungskonzept" beschrieben.

Eine Notfallstrategie zur Betriebssicherheit im HPWL und zum Schutz der Kläranlage bei starken pH-Wert-Schwankungen wurde entwickelt und im Expertensystem implementiert (s. Kapitel 4). Hierbei müssen aufgrund der begrenzten Speicherkapazitäten im Regenwetterfall Prioritäten zwischen den zum Teil entgegengesetzten Steuerungszielen wie z.B. Vermeidung von Überstau, Vermeidung von Entlastungen und Schutz der Kläranlage gesetzt werden.

Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit im HPWL wurden im Expertensystem Empfehlungen implementiert, die bestimmte Maßnahmen bei Überschreitung eines Grenzwertes für den Meßwert Ex-Gas beinhalten - unter Umständen auch die Einstellung des Förderbetriebes zur Kläranlage.

Zum Schutz der biologischen Reinigungsstufe auf der Kläranlage werden nach dem erweiterten Steuerungskonzept bei Einleitungen mit einem pH-Wert außerhalb des Bereiches  $6 < \text{pH} < 10$  vom Expertensystem Steuerungsmaßnahmen vorgeschlagen. Zunächst wird das belastete Abwasser solange wie möglich im Kanalstauraum zurückgehalten, um so eine Mischung mit "normalen" Abwasser zu erzielen. Ab einer bestimmten Auslastung des Kanalstauraums empfiehlt das Expertensystem die Befüllung der Becken bei Reduzierung des Zuflusses zur Kläranlage. Sind die Speicherkapazitäten erschöpft, wird die Gütebetrachtung zugunsten der Mengenbetrachtung aufgegeben, um so Überflutungen zu vermeiden.

Das erweiterte Steuerungskonzept sieht auch eine Vergleichmäßigung der Förderleistung im HPWL zur Kläranlage Seehausen vor (s. Kapitel 5). Eine gleichmäßige Verteilung der Zuflüsse zur Kläranlage zielt auf eine Vermeidung von hydraulischen Spitzenbelastungen, die zu einer Störung der Biozönose der biologische Reinigungsstufe führen können. Für den Tages- und Nachtbetrieb werden vom Expertensystem Förderleistungen zur Vergleichmäßigung der Zuflüsse empfohlen, wobei durch Einbeziehung der Wasserstandsmessung im Kanal die Fließgeschwindigkeiten so hoch gehalten werden, daß keine Ablagerungen auftreten können.

In Kapitel 6 wird eine Abschätzung über das Steuerungspotential für eine güteorientierte Steuerung bei Mischwasserabfluß vorgenommen. Hierzu wurden die Meßdaten und Steuerungsaktionen der oben beschriebenen 5 beprobten Mischwasserereignisse dargestellt und analysiert. Eine güteorientierte Steuerung setzt im allgemeinen Sinn eine Gesamtemissionsbetrachtung voraus. Ziel dabei ist es, die Summe der entlasteten Frachten aus Mischwasserentlastungen und Kläranlagenabläufen zu minimieren.

Aufgrund der meßtechnischen Gegebenheiten am HPWL (Messung der Güteparameter im Pumpensumpf) wird die klärtechnische Wirkung der Becken nicht erfaßt. Informationen über die Beschaffenheit des aus den Becken entlasteten Mischwassers stehen somit nicht zur Verfügung, so daß diese Steuerungsmaßnahme auch nicht hinsichtlich eines güteorientierten Steuerungspotentials untersucht werden kann. Als einzige güteorientierte Steuerungsstrategie kann somit nur die direkte Entlastung aus dem Kanalstauraum in die Weser untersucht werden.

Bei allen untersuchten Niederschlag-Abfluß-Ereignissen lagen die BSB-Konzentrationen des Mischwassers im Pumpensumpf höher als der gesetzliche Grenzwert für Kläranlagenabläufe. Eine direkte Entlastung aus dem Stauraum in die Weser ist demnach nicht möglich.

Im Kanalnetz Bremen-Linkes-Weserufer treten keine charakteristischen Konzentrationsmuster auf, wie z.B. regelmäßige ausgerägte Schmutzstöße bei Niederschlagsbeginn durch Abspülen der Schmutzstoffe auf der Straßenoberfläche und im Kanal, oder Schmutzstöße am Ende der Kanalentleerungsphase. Aufgrund der Trägheit des Systems findet eine Vermischung statt und es besteht deshalb auch nicht die Notwendigkeit, z. B. eines der zwei Becken als "Fangbecken" zu nutzen, d.h. sehr früh in die Becken zu pumpen. Die bei einigen Ereignissen zu Niederschlagsbeginn zu beobachtenden Konzentrationsspitzen sind vermutlich auf indirekte Einleitungen zurückzuführen.

Die jetzige Steuerungspraxis, nach der so weit wie möglich im Stauraum gespeichert wird, danach die RÜB befüllt werden und dann über den Beckenüberlauf entlastet wird, ist gerechtfertigt. Es wird tatsächlich dann entlastet, wenn das Mischwasser weitgehend verdünnt ist. So lassen sich mit den derzeit am HPWL zur Verfügung stehenden Informationen keine Unterschiede zwischen einer güteorientierten und einer mengenmäßigen Steuerung feststellen.

Dies bedeutet aber nicht, daß kein Potential für eine Gütesteuerung vorhanden ist, da nur der einfachste Fall für eine güteorientierte Steuerung untersucht werden konnte. Eine vollständige Ermittlung des güteorientierten Steuerungspotentials setzt eine Gesamtemissionsbetrachtung voraus. Hierfür sind weitere Informationen notwendig, wie die klärtechnische Reinigungsleistung der Becken und die Konzentrationen der Kläranlagenablaufwerte.

Das güteorientierte Steuerungspotential ist umso größer, je schlechter die Absetzwirkung der Becken ist und je empfindlicher die Kläranlage auf hydraulische Belastungen reagiert.

Die Messung der Parameter Leitfähigkeit, pH-Wert und BSB-M3 in der jetzigen Form im Pumpensumpf ist sinnvoll für die Überwachung und Erfassung von indirekten Einleitungen.

Mit Hilfe der BSB-M3-Messung können aber auch im Hinblick auf den gesetzlich vorgeschriebenen Nachweis der Mischwasserentlastungen der vereinfachenden und wahrscheinlich immer überschätzenden Annahme Mischwassermenge = Mischwasserfracht, die tatsächlich in die Weser entlasteten Frachten gegenübergestellt werden. Allerdings müßte hierfür im Idealfall die BSB-M3-Messung direkt an den Einleitungs- und Entlastungsstellen in die Weser vorgenommen werden.

## 1. Genauigkeit und Verzögerungseigenschaften des BSB-M3-Gerätes bei gleichbleibender Abwassermatrix

### 1.1 Literatur- und Firmenangaben zu den dynamischen Eigenschaften

#### 1.1.1 Rechercheergebnisse

Die Zusammenstellung von Literatur- und Firmenangaben über die dynamischen Eigenschaften hat zum Ziel, Anhaltspunkte für die Planung und Ergebnisbewertung der durchzuführenden Versuchsreihe zu erlangen. Eine Recherche in der Fachliteratur ergab 5 relevante Beiträge über das BSB-M3-Gerät der Firma STIP, sowie einen Beitrag über ein Konkurrenzgerät. Die Beiträge sind im Literaturverzeichnis aufgeführt und als Anlage 1 in Kopie beigelegt.

Die Firma STIP stellte zur Thematik Auszüge aus vier unveröffentlichten Studienarbeiten und Diplomarbeiten zur Verfügung (STIP (1993)). Die Arbeiten entstanden an den Fachbereichen Physikalische Technik der FH Wiesbaden und der FH München und dem Institut für Mechanik und Regelungstechnik der GH Siegen. Die Auszüge sind hauptsächlich unkommentierte grafische Darstellungen über Meßgenauigkeit und dynamisches Verhalten der Regelungseinrichtung des BSB-M3-Gerätes.

In einem zweiten Schreiben der Fa. STIP am Ende des Projektes (STIP (1994)) werden Angaben zum Verzögerungsverhalten der BSB-M3-Geräte vom Typ BIOX 1000 und BIOX 1010 gemacht. Die Unterlagen beider Schreiben liegen in Anlage 1 vor.

Die aktuelle Referenzliste der Firma STIP ist ebenfalls in Anlage 1 beigelegt. Sie gestattet einen Überblick über die Einsatzbandbreite des BIOX 1000.

#### 1.1.2 Funktionsfähigkeit des BIOX 1000 bei Mischwasserabfluß

Laut Referenzliste von STIP ist das BIOX 1000 auf kommunalen Kläranlagen in 37 Fällen im Zulauf vor der Vorklärung eingesetzt und in 15 Fällen im Zulauf zur biologischen Stufe. In den meisten Fällen dürfte auch Mischwasserabfluß zur Kläranlage gelangen. Die Abwasserqualität entspricht vor der Vorklärung noch etwa dem Rohabwasser und somit Verhältnissen, die auch am HPWL anzutreffen sind (rechen- und sandfanggereinigtes Rohabwasser). Betriebserfahrungen bei Mischwasserabfluß dürften bei den entsprechenden Anwendern und bei STIP vorliegen, allerdings ist hierüber nicht gesondert publiziert worden.

GEISEL (1992) berichtet über Erfahrungen aus 1-jährigen Einsätzen zweier BIOX 1000 auf Kläranlagen des Ruhrverbandes. Die Geräte erfuhren eine systematische Kontrolle und Wartung. Einen Aufschluß hinsichtlich der Einsatzfähigkeit des BIOX 1000 bei Mischwasserabfluß geben die in Bild 1 wiedergegebenen Auszüge aus dem Betriebstagebuch des Gerätes auf der KA Gevelsberg. Am Montag, den 10.09.90 wurden von 14 - 24 Uhr langanhaltend niedrige Konzentrationen registriert mit einem Minimum von 26 mg/l BSB<sub>5</sub>. Sie entsprechen nicht dem typischen Tagesgang, der für Dienstag bis Sonntag erkennbar ist. Nach Auskunft von GEISEL handelte es sich um Mischwasserabfluß eines Regenereignisses. Der Meßwertverlauf des BIOX 1000 ist plausibel und stetig. Nach Beendigung des Mischwasserabflusses steigen auch die Konzentrationen wieder plausibel an.

Im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen sichtete OTTERPOHL (1993) eine Vielzahl kontinuierlicher BSB-M3-Aufzeichnungen aus kommunalen Kläranlagen. Nach OTTERPOHL wiesen die Konzentrationsganglinien in fast allen Fällen ähnlich plausible Verläufe bei Mischwasserabfluß auf, wie sie am Beispiel der KA Gevelsberg augenscheinlich sind. Vergleiche der frachtgewichteten 24-h-Mittelwerte von BSB-M3 und konventionellem BSB<sub>5</sub> für Tage mit Mischwasserabfluß zeigten weitgehende Übereinstimmung. Dies stellt einen Hinweis dar, daß Übereinstimmungen von BSB-M3 und BSB<sub>5</sub> bei Mischwasserabfluß möglich sind. Differenzierte Untersuchungen lagen auch OTTERPOHL nicht vor.

Angaben von KÖHNE et al. (1986) über Vergleiche von BSB-M3 und BSB<sub>5</sub> im Ablauf der Nachklärung einer Kläranlage (vgl. Bild 2) lassen den vorsichtigen Schluß zu, daß das BIOX 1000 auch bei sehr geringen Konzentrationen zutreffende Daten liefern kann. Allerdings kann das Gerät beim Einsatz an der Nachklärung recht gut an den sehr engen Meßbereich angepaßt werden. In solchen Fällen sind immer gute Resultate zu erwarten. Beim Einsatz im Mischwasserabfluß ist allerdings ein weitaus größerer Meßbereich abzudecken. Erfahrungsgemäß ist bei allen Meßgeräten zwangsläufig ein großer Meßbereich mit geringerer Präzision der Messung verbunden.

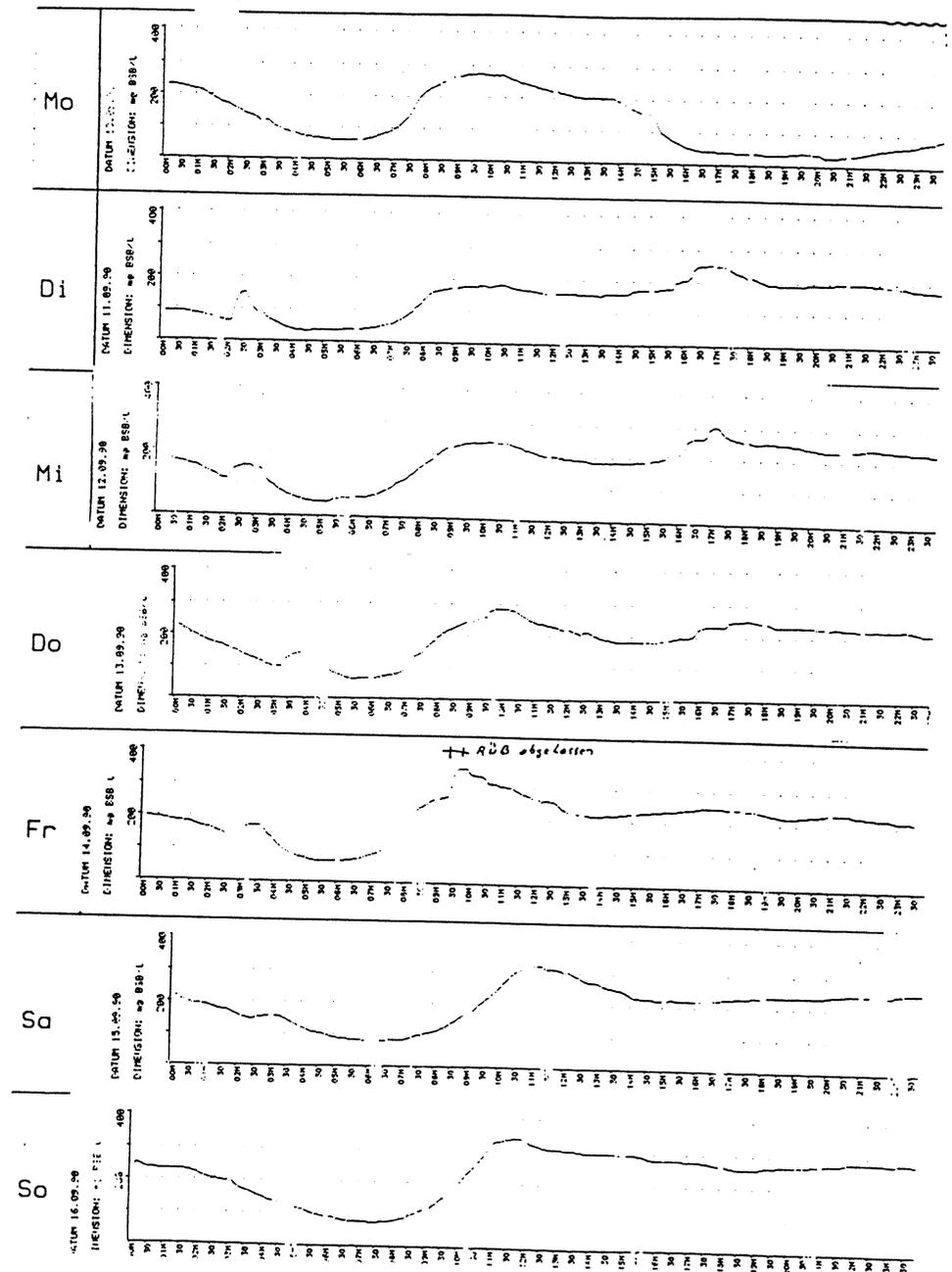


Bild 1: Tagesganglinien eines BIOX 1000 (Zulauf KA Gevelsberg) (GEISEL (1992))

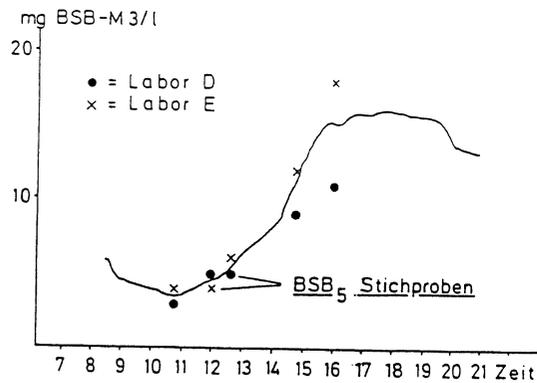


Bild 2: Vergleich von BSB-M3 und BSB<sub>5</sub> am Ablauf einer Nachklärung (KÖHNE et al. (1986))

Das BIOX 1000 ist also offensichtlich bei Mischwasserabfluß funktionsfähig und kann plausible Meßdaten liefern. Eine Beeinträchtigung der Messung während oder nach Mischwasserabfluß ist nicht erkennbar. Vergleichsmessungen von BSB-M3 und BSB<sub>5</sub> bei Mischwasserabfluß wurden offensichtlich noch nicht durchgeführt oder nicht publiziert. Quantitative Angaben zur Genauigkeit der BSB-M3-Messung bei Mischwasserabfluß sind derzeit noch nicht möglich.

### 1.1.3 Dynamisches Verhalten des BIOX 1000

Zum dynamischen Verhalten des BIOX 1000 liegen zwei Testergebnisse in der Literatur vor, die unterschiedlichen Aussagen beinhalten. Ein dritter Beitrag über ein anderes Meßverfahren des Kurzzeit-BSB gestattet eine Grobabschätzung zu erwartender Verzögerungen bei der kontinuierlichen Kurzzeit-BSB-Messung unabhängig vom Verfahren.

Die Unterlagen in STIP (1993) liefern ohne eine weitere Beschreibung und Interpretation der dargestellten Versuche keine Informationen zu dem dynamischen Verhalten des BSB-M3-Gerätes. In STIP (1994) werden Angaben zum Totzeitverhalten der BSB-M3-Geräte BIOX 1000 und BIOX 1010 gemacht.

RIEGLER (1984) stellt einen Versuch zum dynamischen Verhalten des BIOX 1000 bei wechselnder Abwassermatrix dar. Das Ergebnis ist in Bild 3 wiedergegeben. Das

Gerät war im Zulauf einer Industriekläranlage eingesetzt. Der Zulauf zum Gerät wurde schlagartig unterbrochen und Molkereiabwasser mit gänzlich anderer Zusammensetzung und zwei geringeren Konzentrationsniveaus eingespeist.

Das neue niedrige Konzentrationsniveau stellt eine konstante "Belastung" dar, die aufgrund ihres plötzlichen Änderung "Sprungbelastung" heißt. Die gesuchte Reaktion des Gerätes ist die "Sprungantwort", aus der das Verzögerungsverhalten ersichtlich wird. Im vorliegenden Fall handelt es sich um die Sprungantwort bei wechselnder Abwassermatrix. Die Zeit bis zum Erreichen eines Beharrungsniveaus, bei dem sich der Meßwert nicht mehr signifikant ändert, wird hier als sog. T<sub>90</sub> - Wert gedeutet. Der T<sub>90</sub> - Wert gibt die Zeit an, nach der die Sprungantwort eines Meßgerätes 90% des neuen Beharrungswertes erreicht hat.

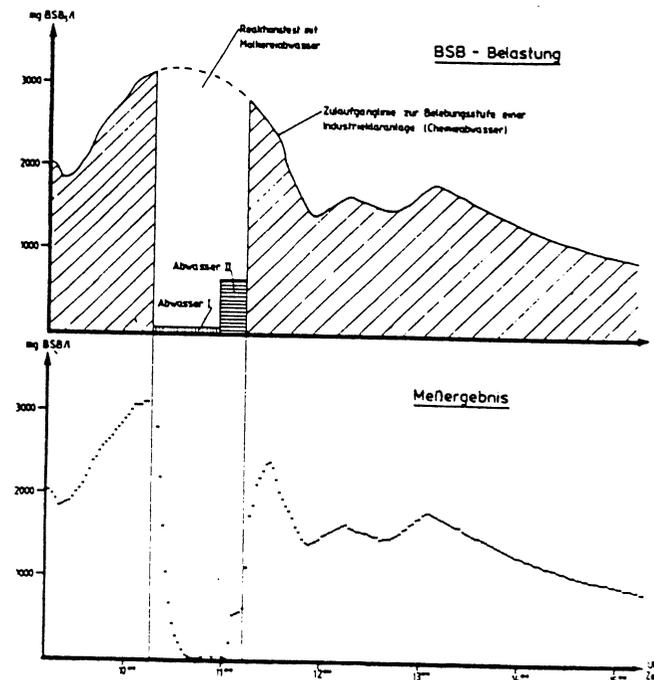


Bild 3: Dynamisches Verhalten des BIOX 1000 bei unterschiedlichen gewerblichen Abwässern (RIEGLER (1984))

Tabelle 1 stellt die einzelnen Sprungbelastungen und zugehörigen Verzögerungszeiten zusammen. RIEGLER läßt offen, ob die BSB<sub>5</sub>-Werte der einzelnen Abwässer nach DIN im Labor analysiert wurden oder ob es sich lediglich um die Meßdaten des BIOX 1000 handelt. Aussagen über die Präzision der BSB-M3-Werte lassen sich daher nicht verlässlich treffen. Die Angaben zum Verzögerungsverhalten bleiben jedoch davon unberührt. Auffällig sind die sehr kleinen T<sub>90</sub>-Werte, die sich in Untersuchungen von KÖHNE et al. (1986) und PILZ (1991) nicht bestätigt haben.

Tab 1: Dynamisches Verhalten des BIOX 1000 bei wechselnder Abwassermatrix (RIEGLER (1984))

Sprungbelastung		Sprungantwort
Abwasserart	BSB <sub>5</sub> [mg/l]	T <sub>90</sub> [min]
Industrieabwasser → Molkereiabwasser	3050 → 50 => 50	14
Molkereiabwasser → Molkereiabwasser	50 → 500 => 450	8
Molkereiabwasser → Industrieabwasser	500 → 2000 => 1500	14

KÖHNE et al. (1986) stellen eine Grundlageuntersuchung zum Vergleich von BSB<sub>5</sub> und BSB-M3 vor, die Basis für die nunmehr übliche Vorgehensweise zur L<sub>k</sub>-Wert-Bestimmung darstellt. Die Untersuchung läßt Angaben zum Verzögerungsverhalten bei gleichbleibender Abwassermatrix zu. Als Anfangsbelastung wurde eine voll durchmischte Probe aus dem Ablauf einer Vorklärung verwendet. Aus ihr wurde durch Verdünnung im Verhältnis 1:3 eine zweite Probe erstellt, die als Sprungbelastung dem Gerät zugeführt wurde. Die Versuchsergebnisse sind in Bild 4 dargestellt. Ausgehend von einem Beharrungsniveau bei ca. 96 mg/l BSB<sub>5</sub> fällt der Meßwert nach Zuführung der verdünnten Probe stetig und erreicht nach 75 Minuten einen Beharrungswert von 30 mg/l. Zuvor tritt jedoch nach etwa 45 Minuten ein sog. "Unterschwinger" auf mit einem Minimum von 25 mg/l. Der T<sub>90</sub>-Wert wird von KÖHNE et al. (1986) mit 15 Minuten angegeben. Das vorhandene Meßwerteschwanken bleibt bei dieser Bewertung unberücksichtigt.

Das eingestellte Verdünnungsverhältnis 1:3 wird vom BIOX 1000 annähernd richtig wiedergegeben. Bei diesem Versuch wurden die Referenzwerte des BSB<sub>5</sub> durch 5 Labors mehrfach analysiert. Bild 4 offenbart die unerfreuliche Streuung der

Analyseergebnisse. Die Mittelwerte aller laboranalytisch bestimmten BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen geben das eingestellte Verdünnungsverhältnis nur mäßig wieder.

Diese Ergebnisse sowie die Problematik des DIN-BSB als Referenzwert für Gerätekontrollen und L<sub>k</sub>-Wert-Bestimmungen wird von KÖHNE et al. (1986) eingehend diskutiert.

Für die Praxis ergeben sich danach folgende Konsequenzen:

1. Tests zum Vergleich von BSB-M3 und BSB<sub>5</sub> sowie L<sub>k</sub>-Wert-Bestimmungen sollten mit genau eingestellten Verdünnungsverhältnissen der Referenzproben vorgenommen werden, um die Laborergebnisse auf Plausibilität prüfen zu können.
2. Die BSB-Analytik der Referenzproben sollte grundsätzlich nur an Labors mit besten Ergebnissen bei BSB-Ringtests vergeben werden.
3. Die Referenzproben müssen mehrfach analysiert werden. Die Ergebnisse sollten einem Ausreißertest unterzogen werden, wenn auffällige Abweichungen vorliegen.

Tab 2: Dynamisches Verhalten des BIOX 1000 bei gleicher Abwassermatrix (KÖHNE et al. (1986))

Sprungbelastung			Sprungantwort
Abwasserart	BSB-M3 [mg/l]	BSB <sub>5</sub> [mg/l] Mittelwerte	T <sub>90</sub> [min]
kommunales Abwasser Ablauf Vorklärung	97	96	-
kommunales Abwasser Ablauf Vorklärung Verdünnung 1:3	30	28	15 (75)

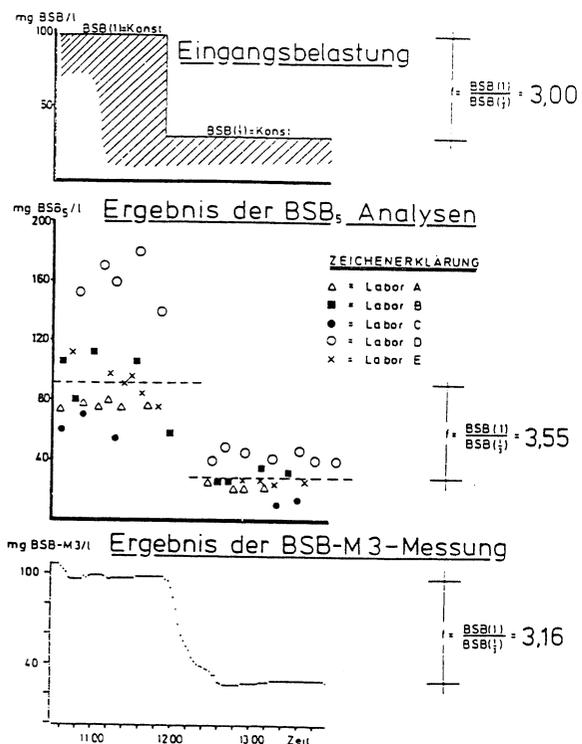


Bild 4: Dynamisches Verhalten des BIOX 1000 bei gleicher Abwassermatrix  
(Ablauf Vorklärung einer kommunalen Kläranlage (KÖHNE et al. (1984))

STIP (1994) enthält Unterlagen zum Verzögerungsverhalten des BIOX 1000 und BIOX 1010. Dargestellt werden Versuche zur Totzeitbestimmung, die vom Landesamt für Wasser und Abfall, Nordrhein-Westfalen auf der Halbtechnischen Kläranlage Neuss-Süd durchgeführt wurden. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Die Versuche wurden als Sprungversuche bei gleichbleibender Abwassermatrix durch Einspeisung verschiedener Konzentrationsniveaus durchgeführt.

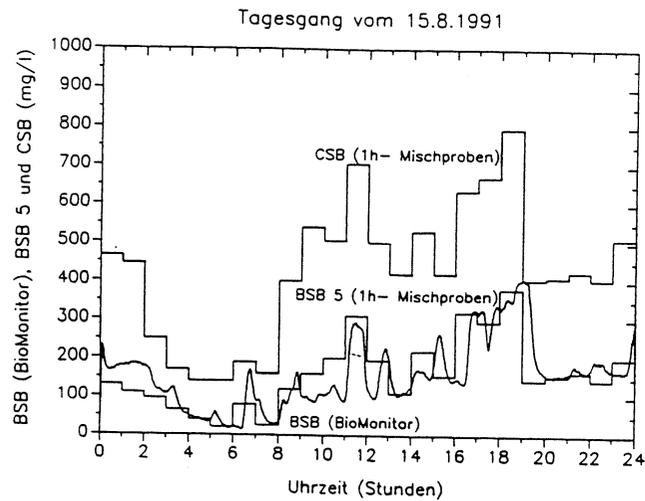
Tab 3: T<sub>90</sub>-Werte des BIOX 1000 und BIOX 1010 bei gleicher Abwassermatrix (STIP (1994))

Gerätetyp	Sprungbelastung	Sprungantwort
	BSB-M3 [mg/l]	T <sub>90</sub> [min]
BIOX 1000	120 → 73 => 47	14,5
BIOX 1000	73 → 120 => 47	12,5
BIOX 1010	128 → 80 => 48	6,3
BIOX 1010	128 → 80 => 48	4,5

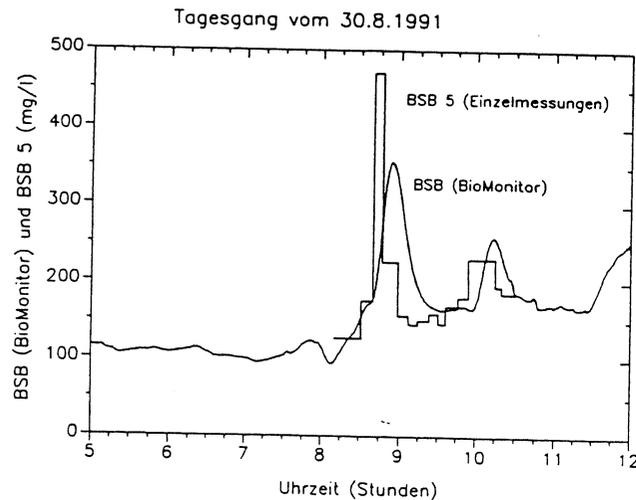
Nach den Untersuchungen auf der HKT Neuss-Süd sind die T<sub>90</sub>-Werte des BSB-Gerätes vom Typ BIOX 1000 mit 12,5 bzw 14,5 Minuten im Vergleich zum neueren Gerätetyp BIOX 1010 in etwa doppelt so groß (4,4 bzw. 6,3 Minuten). Die Totzeiten bei einer Belastungsabnahme sind bei beiden Gerätetypen um etwa 2 Minuten größer als bei einer Belastungszunahme.

PILZ (1991) stellt den BIO-MONITOR vor, ein anderes Gerät zur kontinuierlichen Messung des BSB und berichtet über Ergebnisse von Vergleichsuntersuchungen. Das Gerät war im Ablauf der Vorklärung eingesetzt. Bild 5 gibt Vergleiche von kontinuierlichen Meßdaten mit 1-h-Mischproben wieder. Bild 6 stellt den kontinuierlichen Meßdaten 15-Minuten-Stichproben gegenüber. Die Verfahrenstechniken des BIO-MONITOR und des BIOX 1000 sind unterschiedlich. Vergleichsbetrachtungen der Bilder 5 und 6 lassen jedoch den Schluß zu, daß bei Einsatz eines BIO-MONITOR mit Verzögerungszeiten in der Größenordnung von 15 - 30 Minuten zu rechnen ist.

Als Ergebnis der Literaturrecherche und der Auswertung von Firmenangaben ist festzustellen, daß bei der kontinuierlichen BSB-Messung mit einem BSB-M3-Gerät mit Verzögerungszeiten von 4-15 Minuten zu rechnen ist. Eine exaktere Eingrenzung ist nicht möglich.



**Bild 5:** Vergleich von BIO-MONITOR-Meßsignal und BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen von 1-h-Mischproben (PILZ (1991))



**Bild 6:** Vergleich von BIO-MONITOR-Meßsignal und BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen von Stichproben (PILZ (1991))

#### 1.1.4 Literaturverzeichnis zur Literaturrecherche

Die aufgeführte Literatur ist als Kopie in Anlage 1 beigefügt.

- GEISEL, W. (1991) Betriebserfahrungen mit BSB- und CSB-on-line-Messungen  
Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Heft 22  
Meß-, Steuer- und Regeltechnik in der Siedlungswasserwirtschaft, 9. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft, 1.10.1991, S. 227 - 245
- KALTE, P. (1990) The Continuous measurement of short-time-BOD  
Instrumentation, Control and Automation of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems,  
Proceedings of the 5th IAWPRC Workshop, Yokohama/Kyoto, Japan, 26 July - 3 August 1990, pp. 59 - 68
- KÖHNE, M.; SIEPMANN, F.W.; te HEESSEN, D. (1986)  
Der BSB<sub>5</sub> und der kontinuierliche Kurzzeit-BSB (BSB-M<sub>3</sub>)  
im Vergleich  
Korrespondenz Abwasser 33, Heft 9, 1986, S. 787 - 793
- OTTERPOHL, R. (1993) mündliche Mitteilung  
Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen
- PILZ, U. (1991) Kontinuierliche, simultane Messung des Biochemischen Sauerstoffverbrauchs und der Belebtschlammrespiration  
GWA Nr. 127- Stand der Entwicklung analytischer Systeme zur kontinuierlichen Messung und Steuerung für die Bereiche  
Trinkwasser, Betriebswasser, Abwasser und Gewässer  
15. Aachener Werkstattgespräch, 19./20.09.1991, S. 121 - 135
- STIP (1993) Regelverhalten des BSB-M3-Gerätes  
Auszüge aus unveröffentlichten Diplomarbeiten
- STIP (1994) Verzögerungsverhalten des BIOX 1000 und BIOX 1010  
Untersuchung auf der HTK Neuss-Süd
- RIEGLER, G. (1984) Kontinuierliche Kurzzeit-BSB-Messung  
Korrespondenz Abwasser 31, Heft 5, 1984, S. 369 - 377

## 1.2 Bestimmung der Verzögerungsgleichung des Gerätes aus der Michaelis-Menten-Gleichung

Bei der kontinuierlichen BSB-M3-Messung durchläuft ein Probenstrom des zu untersuchenden Abwassers einen Bioreaktor. Der Probenstrom wird mit Leitungswasser verdünnt, sodaß sich im Reaktor eine konstante Substratumsetzung einstellt. Die Einhaltung diesen Nährstoffniveaus wird über einen gemessenen Sauerstoffverbrauch kontrolliert und geregelt. Das Mischungsverhältnis von Abwasser und Verdünnungswasser dient zur Ermittlung der Nährstoffkonzentration des Abwassers. Die theoretische Grundlage wird durch das reaktionskinetische Modell von MICHAELIS und MENTEN gestellt, welches die biochemische Reaktionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Nährstoffangebot beschreibt. Die Gleichung lautet:

$$\text{Gl.(1)} \quad v = v_{\max} \cdot \frac{L}{k_m + L}$$

mit:  $v$  : Reaktionsgeschwindigkeit  
 $v_{\max}$  : maximale Reaktionsgeschwindigkeit  
 $L$  : Nährstoffangebot  
 $k_m$  : MICHAELIS-Konstante

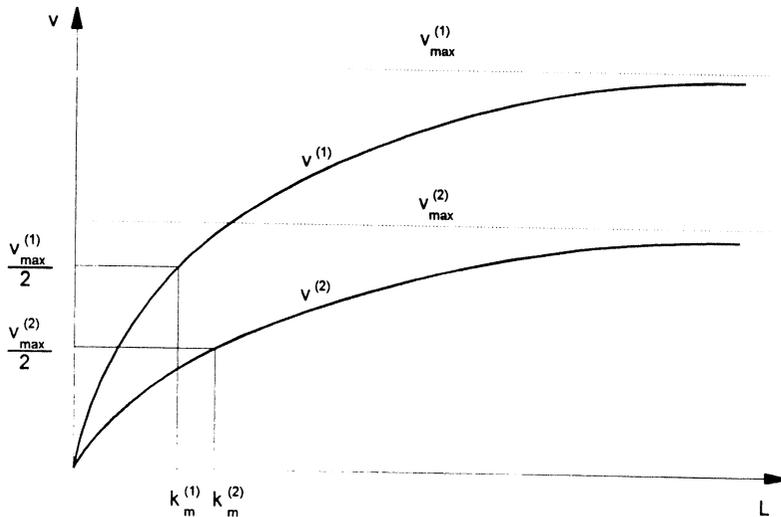


Bild 7: Reaktionsgeschwindigkeit nach MICHAELIS und MENTEN

Die MICHAELIS-Konstante gibt jene Substratkonzentration an, bei der die Reaktionsgeschwindigkeit  $1/2 \cdot v_{\max}$  ist. Ein kleiner Wert für  $k_m$  bedeutet also, daß bereits bei geringer Substratkonzentration eine große Aktivität erreicht wird. Da die Reaktionsgeschwindigkeit  $v_{\max}$  eines Substrats u.a. abhängig ist vom pH-Wert und der Temperatur, ist auch  $k_m$  keine absolute Konstante.

Die Gleichung (1) beschreibt die Form einer Hyperbel. In Bild 7 ist eine qualitative Darstellung für zwei unterschiedliche maximale Reaktionsgeschwindigkeiten  $v_{\max}$  gegeben.

Differenziert man Gleichung (1) nach  $L$  und betrachtet die Ableitung im Punkt  $L=0$ , so erhält man:

$$\text{Gl.(2)} \quad \left. \frac{\partial v}{\partial L} \right|_{L=0} = v_{\max} \cdot \frac{k_m}{(k_m + L)^2} \Big|_{L=0} = v_{\max} \cdot \frac{1}{k_m}$$

Für kleine Substratkonzentrationen läßt sich Gleichung (1) also näherungsweise darstellen durch die folgende Gleichung:

$$\text{Gl.(3)} \quad v = v_{\max} \cdot \frac{L}{k_m}$$

Bei niedrigen Substratkonzentrationen ist die Reaktionsgeschwindigkeit etwa proportional zur Substratkonzentration. Zusätzlich ist in diesem Bereich die Reaktionsgeschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  bei einer Änderung der Substratkonzentration deutlich größer und somit meßtechnisch besser unterscheidbar, als es bei großen Substratkonzentrationen der Fall ist. Aus diesen Gründen arbeitet das BSB-M3-Meßgerät mit einem Sollwert für die Substratkonzentration ( $L_k$ -Wert) im Intervall  $2 \leq L_k \leq 25$  mg/l BSB<sub>5</sub>. Dieser Sollwert des Nährstoffniveaus wird - wie oben beschrieben - über den gemessenen Sauerstoffverbrauch im Bioreaktor kontrolliert und über einen Regelkreis durch Mischung mit Verdünnungswasser konstant eingestellt.

Von der Geschwindigkeit dieser Regeleinrichtung (s. Bild 8) sind die Verzögerungseigenschaften des BSB-M3-Gerätes nach Angaben der Firma STIP hauptsächlich abhängig.

Die Meßzeitverzögerung zwischen Probenahme und Ergebnisausgabe beträgt nach Firmenangaben ca. 3 Minuten. Hinzu kommt eine Verzögerungskonstante, die von KÖHNE et al. (1986) für einen Sprungversuch mit ca. 12 Minuten angegeben wird. Demnach würde sich eine Reaktionszeit bei starken Konzentrationsänderungen von ca. 15 Minuten ergeben.

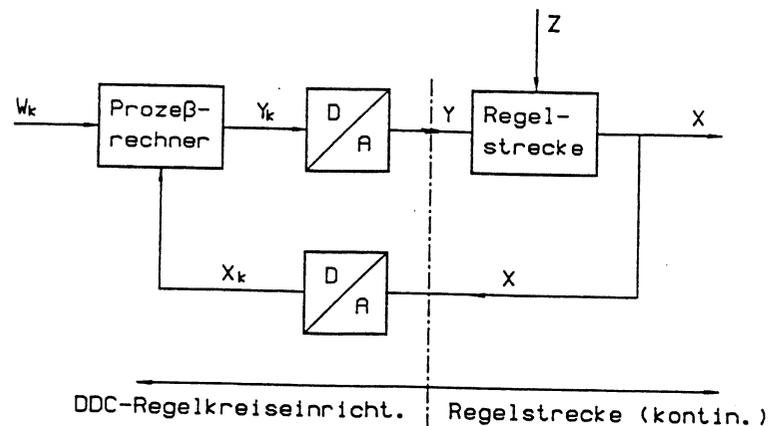


Bild 8: Blockschaltbild des Regelkreises des BSB-M3-Gerätes (STIP (1993))

### 1.3 Durchführung einer Versuchsserie zur Bestimmung der Genauigkeit und der Verzögerungseigenschaften des BSB-M3-Gerätes

#### 1.3.1 Kalibrierungen des BSB-M3-Gerätes

Zur Überprüfung der Funktionsbereitschaft des BSB-M3-Gerätes wurden während des gesamten Untersuchungsprogrammes von Juni 93 bis März 94 begleitend Gerätekalibrierungen, sogenannte  $L_k$ -Wert-Bestimmungen, durchgeführt.

Als Kenngrößen waren zu Beginn des Untersuchungsprogramms folgende Werte im BSB-M3-Gerät eingestellt (Auswahl):

Maximaler Meßwert	2000 mg/l
BSB Vorgabe	500 mg/l
$L_k$ -Wert	4,00
Spülungen / Tag	8
Eichungen / Tag	2

Eine komplette Auflistung der im Gerät eingestellten Kenngrößen zeigen die Kontrollausdrucke in Anlage 2.

Die  $L_k$ -Wert-Bestimmungen erfolgten gemäß dem Betriebshandbuch der Fa. STIP: In das BSB-M3-Gerät wird Abwasser mit konstanter Konzentration aus einem Behälter eingespeist. Der Behälter ist mit einem Rührwerk ausgestattet, so daß von einem homogenisierten Zustand des Abwassers ausgegangen werden kann. Wenn der Meßwert des BSB-M3-Gerätes einen Beharrungszustand (Niveau 1) erreicht, werden 5 Proben dem Einspeisungsbehälter entnommen und als Referenzanalyse der  $BSB_5$  im Labor bestimmt.

Danach wird das Abwasser im Behälter mit Leitungswasser ungefähr im Verhältnis 1:3 verdünnt und in das Gerät eingespeist, bis wieder ein Beharrungszustand (Niveau 2) erreicht ist. Dann erfolgt wieder die Entnahme von 5 Referenzproben für die Laboranalyse.

Der neuer  $L_k$  - Wert berechnet sich dann wie folgt:

$$L_k - \text{Wert} = \text{alter } L_k - \text{Wert} \cdot \frac{\text{Mittelwert } BSB_5 \text{ Niveau 1}}{\text{Mittelwert } BSB - M3 \text{ Niveau 1}}$$

Zur gegenseitigen Kontrolle von Laborergebnissen und BSB-M3-Meßwerten dient die Berechnung des Verhältnisse von Niveau 1 zu Niveau 2 jeweils für die BSB<sub>5</sub>- und die BSB-M3-Werte.

Tabelle 4 zeigt eine Zusammenstellung der Ergebnisse der L<sub>k</sub>-Wert-Bestimmungen während des Untersuchungszeitraums.

Tab. 4: L<sub>k</sub>-Wert-Bestimmungen im Zeitraum des Untersuchungsprogrammes

L <sub>k</sub> -Wert Bestimmung Datum	berechneter L <sub>k</sub> - Wert	Verhältnis Niveau 1 / Niveau 2 BSB <sub>5</sub>	Verhältnis Niveau 1 / Niveau 2 BSB-M3	eingestellter L <sub>k</sub> -Wert
-	-	-	-	4,0
24.06.93	3,81	2,51	2,62	3,8
12.07.93	3,40	3,24	2,61	3,8
01.09.93	4,90	4,47	4,18	4,4
03.12.93	7,90	3,13	3,40	4,4
29.03.94	4,17	3,06	2,97	4,4

Zu Beginn des Untersuchungsprogrammes war werkseitig ein L<sub>k</sub>-Wert von 4,0 eingestellt. Nach der ersten L<sub>k</sub>-Wert-Bestimmung am 24.06.1993 wurde der Wert auf 3,8, und am 1.9.1993 auf Vorschlag der Fa. STIP auf 4,4 korrigiert - als Mittel der beiden zuletzt bestimmten L<sub>k</sub>-Werte: 3,40 und 4,90. Die Streuung der berechneten L<sub>k</sub>-Werte liegt nach Firmenauskunft in einer vertretbaren Größenordnung. Nach deren Angabe ist bei den BSB-M3-Werten eine Meßgenauigkeit von 5% anzusetzen. Hinzu kommen die schon in Kapitel 1.1 beschriebene Unsicherheiten bei der Laboranalyse, die mit 15-20% Abweichung zu berücksichtigen sind.

Der L<sub>k</sub>-Wert am 3.12.1993 ist mit 7,9 eindeutig zu hoch und nicht brauchbar, da bei den im gleichen Zeitraum durchgeführten Regenwetterbeprobungen die BSB<sub>5</sub>-Laborergebnisse und die BSB-M3-Konzentrationen übereinstimmten. Das Gerät arbeitete daher offensichtlich korrekt. Mögliche Ursache für den hohen L<sub>k</sub>-Wert könnte sein, daß das Abwasser für die Laboranalyse aus einer nicht homogenisierten, teilweise schon abgesetzten Probe entnommen wurde, was einen höheren BSB<sub>5</sub>-Wert bedeuten würde und damit den hohen L<sub>k</sub>-Wert erklärt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Kalibrierung des BSB-M3-Gerätes mit vielen Unsicherheiten und Ungenauigkeiten behaftet ist, und auch bei Anrechnung der grundsätzlichen Problematik bei der BSB-Bestimmung einen nicht zufriedenstellenden Eindruck hinterläßt.

Erwähnt werden soll an dieser Stelle auch, daß beim BSB-M3-Gerät im Untersuchungszeitraum mehrfach Störungen, vor allem im Bereich der O<sub>2</sub>-Sonden auftraten. Eine regelmäßige, tägliche Inspektion des BSB-M3-Gerätes ist deshalb zur Gewährleistung eines reibungslosen Meßbetriebes gerade auch im Hinblick auf eine güteorientierte Abflußsteuerung notwendig.

### 1.3.2 Dynamischer Test des BSB-M3-Gerätes am 2.8.1993

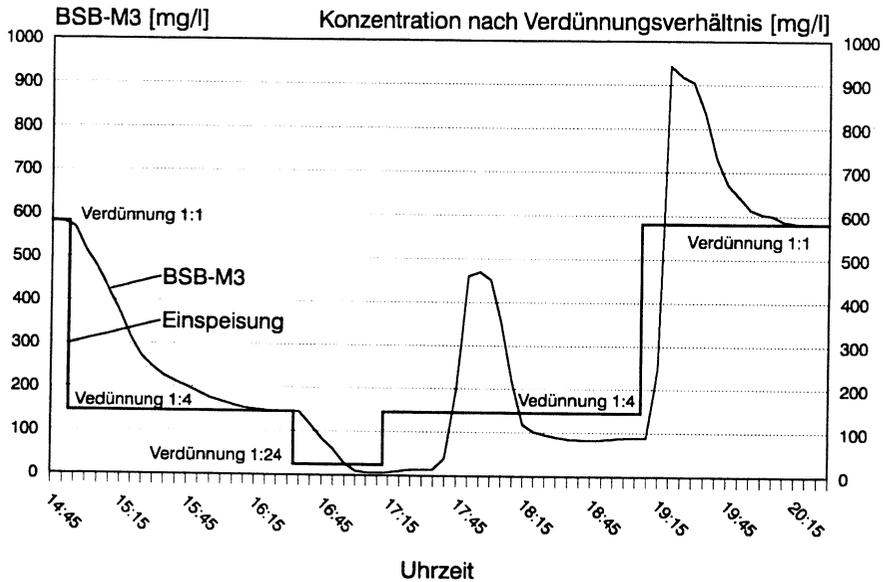
Eine erste experimentelle Untersuchung der Verzögerungseigenschaften des BSB-M3-Analysegerätes im HPWL wurde am 2.8.1993 durchgeführt. Hierzu wurde in das Gerät in unterschiedlichen Verhältnissen verdünntes Schmutzwasser eingespeist. Der Versuchsaufbau und -durchführung erfolgte in Absprache mit der Herstellerfirma STIP als Sprungversuch nach folgendem Muster:

In das BSB-M3-Gerät wird über den Eichbehälter des Gerätes Abwasser mit einem konstanten Konzentrationsniveau (Ausgangskonzentration) eingespeist bis das Meßgerät einen Beharrungszustand anzeigt. Dann erfolgt schlagartig - ebenfalls über den Vorlagebehälter - die Einspeisung eines anderen Konzentrationsniveaus. Diese Einspeisung ist die Sprungbelastung, die Meßwertanzeige des BSB-M3-Gerätes die Sprungantwort. Die gemessenen BSB-M3-Werte werden bis zum Erreichen eines neuen Beharrungszustandes in einem Versuchsprotokoll notiert. Der gleiche Versuchsablauf wird dann für verschiedene Konzentrationsniveaus wiederholt.

Bild 9 zeigt die Ergebnisse dieses dynamischen Tests. Die treppenförmige Linie zeigt den Konzentrationsverlauf der Einspeisungen. Die Einspeisungen wurden aus eine Schmutzwasserprobe durch Verdünnung in den Verhältnissen 1:4 und 1:24 hergestellt und entsprechend der Reihenfolge der in Bild 9 dargestellten Stufen dem Gerät zugeführt. Parallel wurden jeder Verdünnungsstufe Referenzproben für eine BSB<sub>5</sub>-Bestimmung entnommen. Die eingestellten Verdünnungsverhältnisse werden vom BSB-M3-Gerät für zwei Verdünnungsniveaus exakt richtig wiedergegeben. Bei zwei Einspeisungen zeigt das Meßgerät zu geringe Werte an. Auffällig sind die beiden Überschwinger bei einem Wechsel zu einer höheren Konzentration.

Dieses Verhalten und die hohen Verzögerungszeiten (35 - 105 min) deuten nach Ansicht der Firma STIP darauf hin, daß Störungen im Gerät während der Versuchsdurchführung vorlagen. Höchstwahrscheinlich gelangte Luft in das ge-

schlossene Rohrleitungssystem und in den Bio-Reaktor, was zu einer Meßverfälschung führte.



**Bild 9:** Ergebnisse des dynamischen Tests am 2.8.1993

Die Ergebnisse dieses ersten Versuches können deshalb nicht zur Beurteilung des Reaktionsverhaltens des Gerätes verwendet werden.

Zudem wiesen die Referenzproben zu große Streuungen auf. Die vom BSB-M3-Gerät teilweise richtig angezeigten Verdünnungsverhältnisse wurden bei den BSB5-Analysen nicht richtig wiedergegeben.

Auf weitere Darstellungen und Ergebnisse des dynamischen Tests wird deshalb hier verzichtet. Sie sind aber zur Vervollständigung der Unterlagen in Anlage 3 beigelegt.

### 1.3.3 Dynamischer Test des BSB-M3-Gerätes am 10.9.1993

Am 10.9.1993 wurde ein weiterer Versuch zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens des BSB-M3-Analysegerätes durchgeführt.

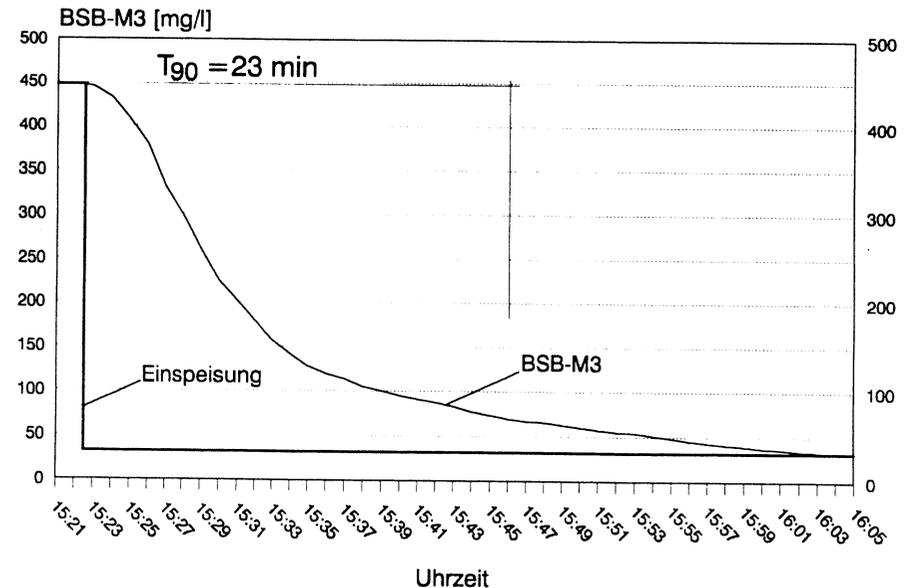
Der Versuchsaufbau und die Durchführung erfolgte wieder in Absprache mit der Herstellerfirma STIP nach dem gleichen Muster wie beim Versuch am 2.8.1993. Die Versuchsprotokolle sind in Anlage 3 beigelegt.

#### Versuch 1:

Als Ausgangskonzentration wird das BSB-M3-Gerät mit einem Abwasser mit einer Konzentration von 447 mg/l BSB-M3 beschickt.

Durch Verdünnung dieses Abwassers mit Leitungswasser - ungefähr im Verhältnis 1:14 - ergab sich als Konzentration für die Einspeisung 32 mg/l BSB-M3. Das eingespeiste Abwasser weist die gleiche Abwassermatrix auf, da die Ausgangskonzentration lediglich mit Leitungswasser verdünnt wurde.

In Bild 10 ist der zeitliche Verlauf des Versuches grafisch dargestellt. Die Sprungbelastung (Einspeisung) ist als treppenförmiger Konzentrationswechsel zu erkennen. Die Sprungantwort (Meßwert BSB-M3) nähert sich in einer Kurve mit exponentiellem Verlauf der eingespeisten Konzentration an, bis nach ca. 40 Minuten ein Beharrungszustand erreicht wird.



**Bild 10:** Dynamisches Verhalten des BSB-M3-Gerätes im HPWL (Versuch 1)

Um eine Vergleichbarkeit mit den Angaben in der Literatur (s. Kap.1.1) herzustellen, wird für die Beurteilung des dynamischen Verhaltens des BSB-M3-Gerätes wieder der  $T_{90}$ -Wert ermittelt. Der  $T_{90}$ -Wert gibt die Zeit an, nach der die Sprungantwort des Meßgerätes 90% der Sprungbelastung erreicht hat.

Für den Versuch 1 ergibt sich ein  $T_{90}$ -Wert von 23 Minuten.

#### Versuch 2:

Die Sprungbelastung im zweiten Versuch wird als Konzentrationserhöhung von 438 mg/l BSB-M3 auf 1002 mg/l BSB-M3 aufgebracht. Das Ausgangsniveau entspricht in etwa dem in Versuch 1. Die Einspeisung wird durch Zugabe von Bier zur Ausgangskonzentration im Verhältnis 2l Abwasser + 0,5l Bier hergestellt. Das Bier kann von den Bakterien im Bio-Reaktor als reiner Nährstoff umgesetzt werden. Die Abwassermatrix wird somit nur dahingehend verändert, daß ein Nährstoff hinzugefügt wird.

Die grafische Aufbereitung des Versuchs zeigt Bild 11. Die Sprungantwort des BSB-M3-Gerätes nähert sich wieder in einer Kurve mit exponentiellem Verlauf dem eingespeistem Niveau an und erreicht nach ca. 22 Minuten den Beharrungszustand. Der  $T_{90}$ -Wert beträgt bei diesem Sprungversuch 12 Minuten.

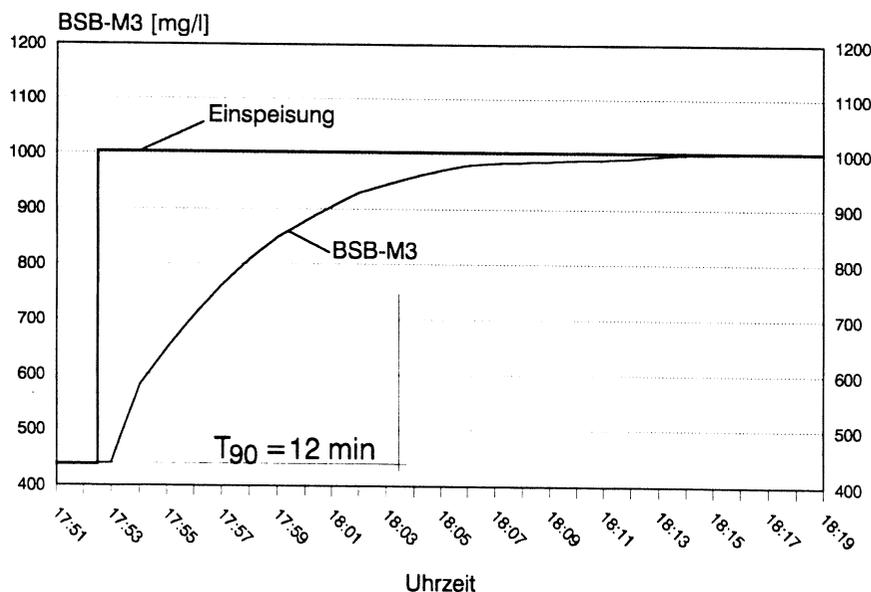


Bild 11: Dynamisches Verhalten des BSB-M3-Gerätes im HPWL (Versuch 2)

In Tabelle 5 sind für die beiden Versuche die  $T_{90}$ -Werte mit den dazugehörigen Sprungbelastungen zusammengestellt worden. Die Ergebnisse der dynamischen Tests stimmen bei einer Belastungszunahme mit den Angaben in Literatur überein. Hier werden  $T_{90}$ -Werte zwischen 8 und 15 Minuten angegeben. Bei einer Belastungsabnahme weist das BSB-M3-Gerät im HPWL um ca. 9 Minuten zu große  $T_{90}$ -Werte auf.

Tab. 5:  $T_{90}$ -Werte des BSB-M3-Gerätes im HPWL und Angaben in der Literatur

Sprungbelastung	Sprungantwort	
	BSB-M3 HPWL	Literatur
[mg/l BSB-M3]	$T_{90}$ [min]	$T_{90}$ [min]
447 → 32 => 415	23	14 RIEGLER (1984) 14,5 STIP (1994)
438 → 1002 => 564	12	8 - 14 RIEGLER (1984) 15 KÖHNE (1986) 12,5 STIP (1994)

## 2. Genauigkeit und Verzögerungseigenschaften des BSB-M3-Gerätes bei Mischwasserabfluß (veränderte Abwassermatrix)

### 2.1 Durchführung einer Regenwetterbeprobungskampagne zur Bestimmung der Genauigkeit und der Verzögerungseigenschaften des Gerätes

Von September 1993 bis Januar 1994 wurde eine Beprobungskampagne bei Mischwasserabfluß im HPWL durchgeführt. Bei 5 größeren Niederschlagsereignissen wurden jeweils 18 Kurzzeitmischproben verteilt über das Ereignis entnommen. Das Ziel der Beprobungen war es, Referenzanalysen auf den BSB<sub>5</sub> im Labor durchführen zu lassen, um so die Genauigkeit und das dynamische Verhalten des BSB-M3-Gerätes zu überprüfen. Weitere Fragestellungen waren in diesem Zusammenhang, ob die Ergebnisse des dynamischen Test auf den normalen Meßbetrieb bei Regenwetter übertragbar sind und welchen Einfluß die veränderte Abwassermatrix bei Mischwasserabfluß auf die Biologie des Gerätes hat.

Der logistische Ablauf der Beprobungen sah wie folgt aus:

Abhängig von der Wetterlage und der örtlichen Situation am HPWL (erkennbarer Abfluß auf den Straßen, 5mm Niederschlag HPWL, Wasserstand Pegel H10, etc.) wurde eine Rufbereitschaft von dem diensthabenden Maschinisten im HPWL aktiviert und das Personal für die Durchführung einer Beprobung benachrichtigt.

Nach der Ankunft des Beprobungspersonals im HPWL wurden zunächst Eintragungen über die augenblickliche Situation (Niederschlagssumme Regenschreiber NO<sub>2</sub>, Wasserstand Pegel H10 und Beckenbefüllung ja/nein, etc) in das Beprobungsprotokoll gemacht. Das Führen eines Beprobungsprotokolls sollte gewährleisten, daß auch bei Ausfall des Datenerfassungssystems die durchgeführten Beprobungen nicht wieder hätten verworfen werden müssen. Ein Protokollformular und die ausgefüllten Protokollblätter der fünf Beprobungen enthält Anlage 4.

Die Probennahme erfolgte unmittelbar vor dem BSB-M3-Gerät durch Öffnen eines Auslaßhahnes. Entnommen wurden 5-Minuten-Mischproben nach folgendem Muster:

5 min Probenahme, 5 min Pause, 5 min Probenahme, 5 min Pause etc.

Die fünfminütige Probennahme erfolgte als Mischprobe:

Im Zeitintervall von 1 Minute wurden jeweils ca. 0,2 ml in die Probeflasche dosiert. Das Probeflaschenvolumen beträgt 1Liter, so daß nach 5 Minuten und 5x0,2ml Entnahmen die Probenflasche gefüllt ist.

Während der fünfminütigen Probennahme wurden in das Protokollformular folgende Eintragungen gemacht:

- Uhrzeit bei Beginn der Probennahme
- BSB-M3-Anzeige während der Probennahme
- Uhrzeit bei Ende der Probennahme
- BSB-M3-Anzeige in der Pause danach
- Proben-Nummer

Jede 5-Minuten-Probe bekam folgende Klebestreifenbeschriftung:

	Datum	BEB	Proben-Nr.
Beispiel:	8.9.93	BEB	Probe 3

Nach der Beschriftung wurden die Probeflaschen in einer Tiefkühltruhe bei -18°C eingefroren.

Die Beprobung endete 3 Stunden nach Beprobungsbeginn, dies bedeutet eine Entnahme von 18 Proben mit je 1Liter Volumen.

Aus diesen 18 Proben wurden anhand des Ganglinienverlauf der BSB-M3-Werte 10 repräsentative und aussagekräftige Proben ausgewählt und zur BSB<sub>5</sub>-Bestimmung in ein Analyselabor geliefert.

Die Ergebnisse der Laboranalysen enthält Anlage 4.

### 2.2 Ergebnisse der Regenwetterbeprobungen

Eine Übersicht über die fünf beprobten Niederschlagsereignisse mit den jeweiligen Niederschlagssummen und weiteren Informationen zur Einordnung der Ereignisse gibt Tabelle 6.

Tab. 6: Beprobte Niederschlagsereignisse im HPWL

Datum	Wochentag	Niederschlags- summe (NO <sub>2</sub> )	Entlastung in die Weser	Beprobung	
				von	bis
22./23. 9.93	Mi /Do	13,4 mm	ja	21:30	00:30
3.10.93	So	14,6 mm	nein	12:00	15:00
8.10.93	Fr	7,3 mm	nein	12:25	15:25
8.12.93	Mi	9,9 mm	nein	22.10	01:10
27.1.94	Do	14,1 mm	ja	14:20	17:20

In den Bildern 12 bis 16 sind für jedes der 5 beprobten Ereignisse jeweils der Niederschlag, die BSB-M3-Ganglinie, die Leitfähigkeit und die 10 BSB<sub>5</sub>-Referenzwerte in ihrem zeitlichen Verlauf aufgetragen.

Die Leitfähigkeit wird als ein weiterer Güteparameter im HPWL kontinuierlich gemessen. Seine Darstellung erscheint in diesem Zusammenhang sinnvoll, da untersucht werden kann, ob ein Zusammenhang zwischen Leitfähigkeitsverlauf und BSB-M3-Verlauf besteht und welchen Einfluß das mit Regenwasser verdünnte Schmutzwasser auf die beiden Parameter hat.

Auf die Genauigkeit und die Verzögerungseigenschaften des BSB-M3-Gerätes bei diesen Niederschlagsereignissen wird in gesonderten grafischen Darstellung später noch eingehend eingegangen. Zunächst sollen die fünf beprobten Ereignisse in ihrem Verlauf betrachtet werden.

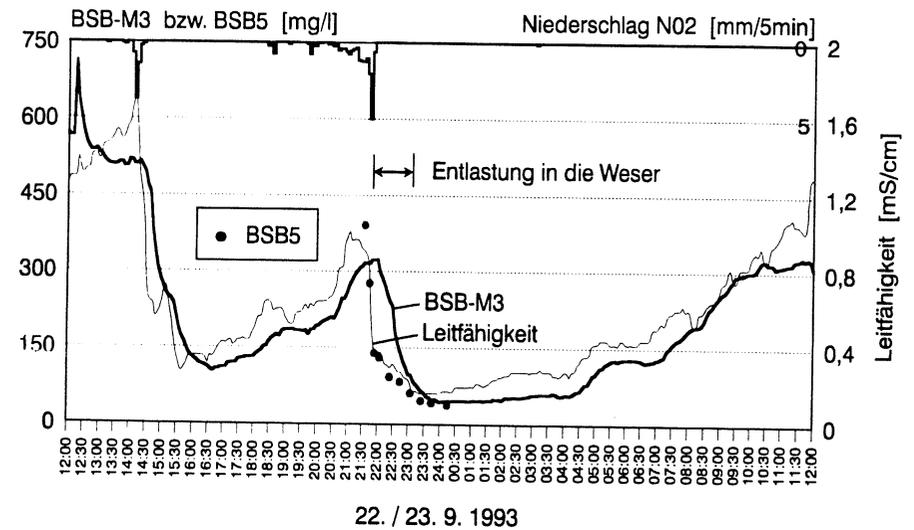
Bei allen fünf Ereignissen ist ein deutliches Abfallen der BSB-M3- und Leitfähigkeitswerte bei Mischwasserabfluß beobachten. Ursache hierfür ist bei beiden Parametern die Verdünnung des Schmutzwassers mit Regenwasser. Der BSB nimmt aufgrund der geringen organischen Belastung des Regenwassers ab, die Leitfähigkeit wegen der geringen Ionenanzahl im Regenwasser.

Bei einigen Ereignissen sind Konzentrationsspitzen beobachten, die vermutlich durch indirekte Einleitungen in das Kanalnetz verursacht werden. Andere mögliche Ursachen, wie z. B. ein Schmutzstoß durch Straßenabflüsse (First-Flush) oder durch Remobilisierung von Ablagerungen scheiden höchstwahrscheinlich aus, da kein charakteristisches Konzentrationsmuster bei den Niederschlagsereignisse zu erkennen ist.

Anhand der als Punkte gekennzeichneten BSB<sub>5</sub>-Referenzproben kann der tatsächliche zeitliche Verlauf der im Schmutzwasser vorhandenen BSB-Konzentration rekonstruiert und mit den BSB-M3-Werten verglichen werden.

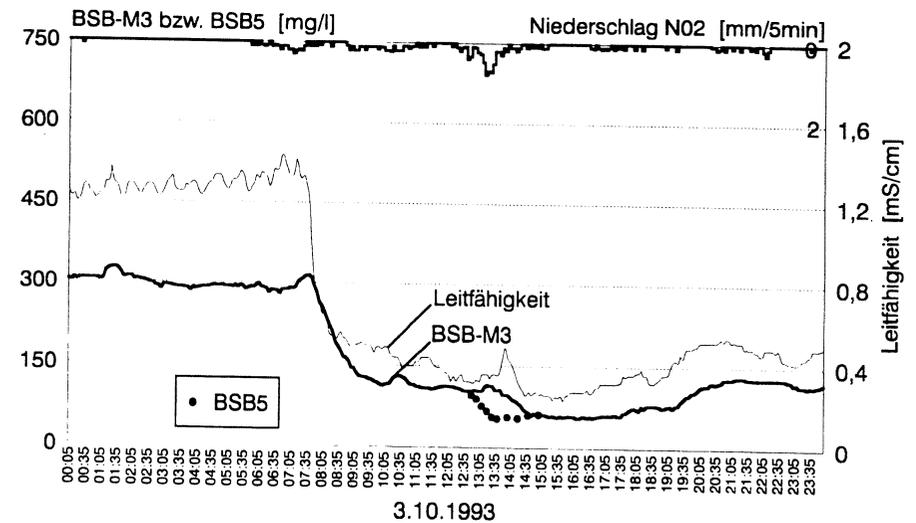
Bei zwei Ereignisse, am 22./23.9.1993 und am 27.1.1994 wurde während der Beprobung in die Weser entlastet, so daß neben den BSB-M3-Werten auch die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen für Aussagen über den Verschmutzungsgrad des entlasteten Mischwassers zur Verfügung stehen.

Am 8.12.1993 liegt offensichtlich keine korrekte Leitfähigkeitsmessung vor, da der Verlauf der Ganglinie auch bei Mischwasserabfluß völlig untypisch einen konstanten Wert anzeigt.



22. / 23. 9. 1993

Bild 12: Regenwetterbeprobung am 22./23.9.1993



3.10.1993

Bild 13: Regenwetterbeprobung am 3.10.1993

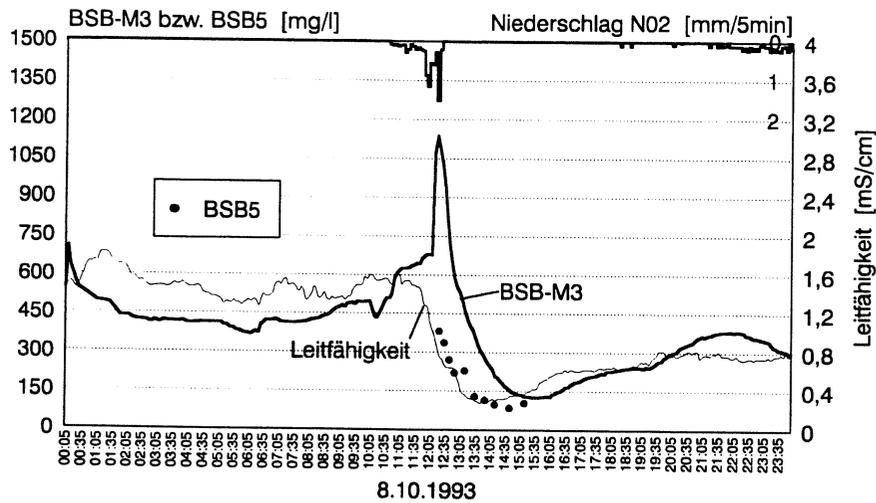


Bild 14: Regenwetterbeprobung am 8.10.1993

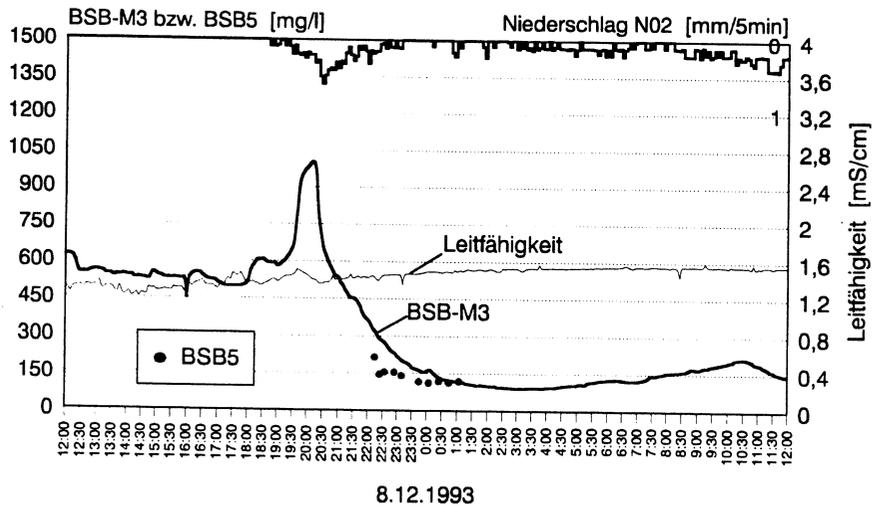


Bild 15: Regenwetterbeprobung am 8.12.1993

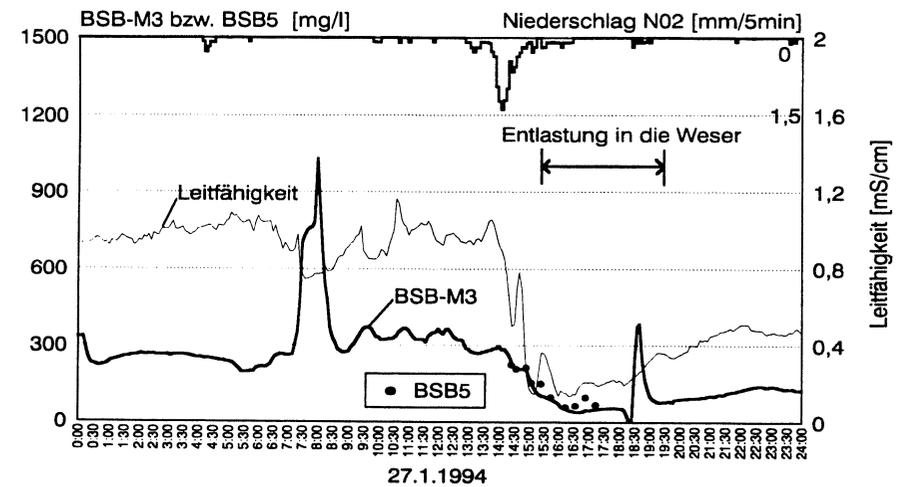


Bild 16: Regenwetterbeprobung am 27.1.1994

Um die Genauigkeit und Verzögerungseigenschaften der BSB-M3-Messung besser untersuchen zu können, zeigen die Bilder 17 bis 21 für jedes der fünf Mischwassereignisse den beprobten Zeitraum in einer größeren Auflösung.

In den Grafiken werden die BSB-M3-Werte, die BSB<sub>5</sub>-Analyseergebnisse für die jeweilige Probe und die um einen Zeitfaktor verschobenen BSB<sub>5</sub>-Werte dargestellt. Die BSB<sub>5</sub>-Werte geben den tatsächlichen BSB-Konzentrationsverlauf in dem beprobten Zeitabschnitt des Ereignisses wieder.

Durch eine Verschiebung der BSB<sub>5</sub>-Werte um einen Zeitfaktor konnte bei allen fünf Ereignissen die BSB<sub>5</sub>-Ganglinie weitgehend mit der BSB-M3-Ganglinie zur Deckung gebracht werden. Der Verlauf der BSB-Konzentration wird daher offensichtlich qualitativ und quantitativ richtig von dem BSB-M3-Gerät wiedergegeben. Bezüglich der Genauigkeit der BSB-M3-Messung kann man demnach von einer korrekten Messung der BSB-Konzentration ausgehen, allerdings mit einer zeitlichen Verzögerung.

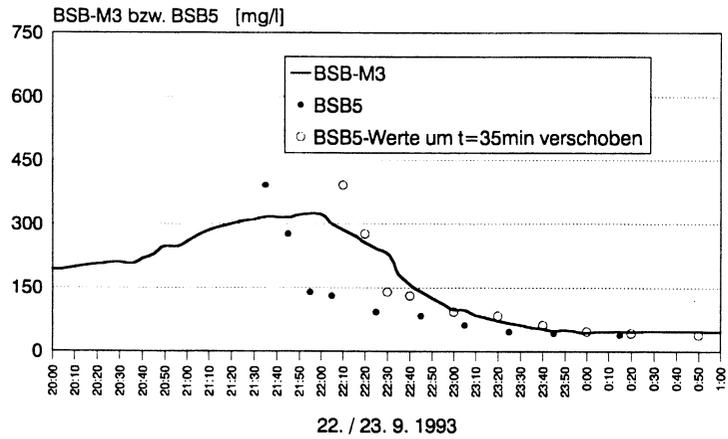


Bild 17: Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes bei der Regenwetterbeprobung am 22./23.9.1993

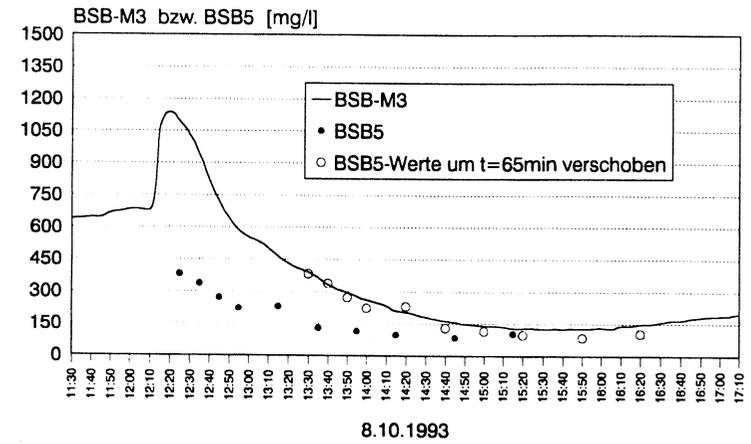


Bild 19: Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes bei der Regenwetterbeprobung am 8.10.1993

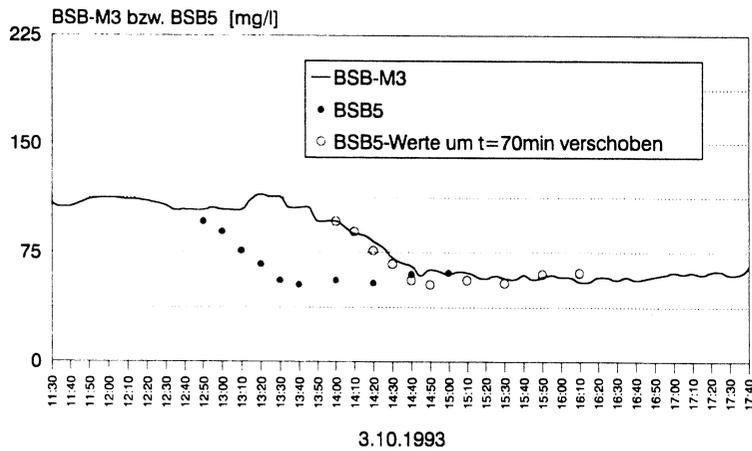


Bild 18: Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes bei der Regenwetterbeprobung am 3.10.1993

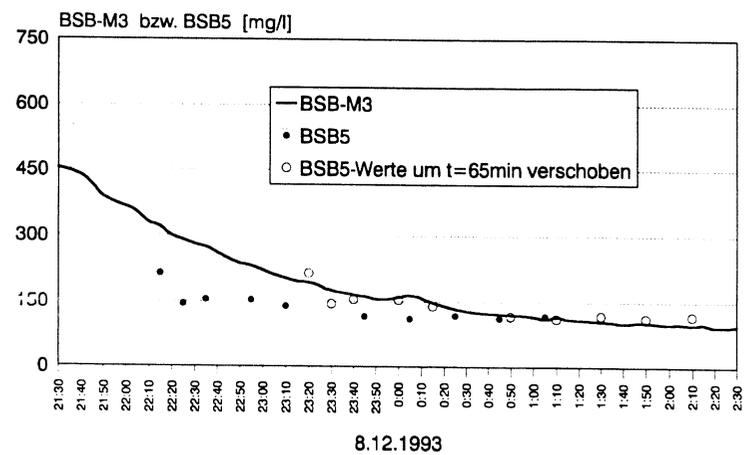
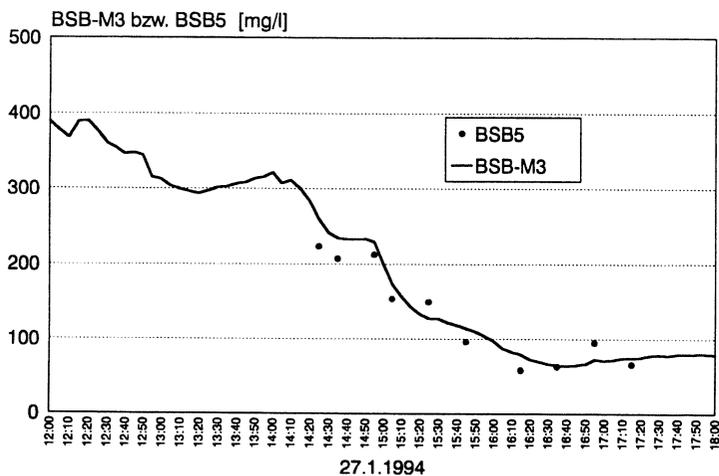


Bild 20: Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes bei der Regenwetterbeprobung am 8.12.1993



**Bild 21:** Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes bei der Regenwetterbeprobung am 27.1.1994

Die Verzögerungseigenschaften der BSB-M3-Messung lassen sich durch die Verschiebung der BSB<sub>5</sub>-Ganglinie um einen bestimmten Zeitfaktor quantifizieren. Für die fünf Mischwasserereignissen ergeben sich die in Tabelle 7 zusammengestellten Zeitfaktoren.

**Tab. 7:** Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes bei Mischwasser

Niederschlagsereignis Datum	Verzögerung des BSB-M3-Meßwertes
22./23.9.1993	35 min
3.10.1993	70 min
8.10.1993	65 min
8.12.1993	65 min
27.1.1994	0 - 3 min

Mit Ausnahme des Ereignisses am 27.1.1994 sind die Meßwertverzögerungen erheblich größer als die T<sub>90</sub>-Werte bei dem dynamischen Tests und den Angaben in der Literatur. Bis dato konnte auch keine Erklärung für dieses Verzögerungsverhalten gefunden werden. Nach Angaben der Fa. STIP hat die wechselnde Abwasser-

matrix bei Mischwasserabfluß keinen Einfluß auf das Verzögerungsverhalten, zumal die BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen quantitativ richtig wiedergegeben werden. Toxische Substanzen scheiden deshalb ebenfalls als Ursache aus.

Bei drei Mischwasserereignissen liegt der Verzögerungsfaktor in der gleichen Größenordnung bei ca. 60 Minuten. Die stark abweichenden Werte bei den beiden anderen Ereignissen lassen aber auf keine Systematik schließen.

Ein Gerätefehler kann weitgehend ausgeschlossen werden, da eine regelmäßige Wartung des Gerätes durch das Betriebspersonal erfolgte und die Protokollausdrucke über den Gerätezustand keine Unregelmäßigkeiten erkennen lassen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes im HPWL wurden der Herstellerfirma STIP mitgeteilt, mit der Bitte um eine schriftliche Stellungnahme. In dem Antwortschreiben (STIP (1994) in Anlage 1) wird seitens des Herstellers bestätigt, daß offensichtlich keine Störungen in der Meßtechnik vorliegen. Die Fa. STIP hat deshalb auch keine Erklärung für die Meßzeitverzögerungen. Nach den Erfahrungen der Fa. STIP aus vielen Untersuchungen müßte die Meßzeitverzögerungen sich in der Größenordnung von 5 Minuten bewegen. Im praktischen Einsatz kann es nach Auffassung des Herstellers nur bei einem Wartungseingriff unmittelbar vor einem extremen Konzentrationswechsel zu größeren Zeitverzögerungen kommen.

Dieses kann aber für das BSB-M3-Gerät im HPWL für die beprobten Regenwetterereignisse ausgeschlossen werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß das BSB-M3-Meßgerät im HPWL die vorhandenen BSB-Konzentrationen korrekt mißt. Als Meßwertverzögerung wurde ein Spektrum von 3 bis zu 70 Minuten festgestellt. Aufgrund der Schwankungsbreite der Werte kann kein einheitlicher Verzögerungsfaktor systematisiert werden.

Dieses wäre aber für den Einsatz des BSB-M3-Gerätes für Steuerungszwecke mindestens notwendig. Mit Meßwertverzögerungen von ungefähr 60 Minuten wäre das BSB-M3-Gerät für on line Steuerungszwecke allerdings nicht geeignet. Daß eine quantitativ und zeitlich korrekte Messung offensichtlich möglich ist, zeigt die Beprobung vom 27.1.1994.

### 2.3 Untersuchung zur Repräsentativität der gemessenen Güteparameter am Hauptpumpwerk Linkes Weserufer

Zur Untersuchung der Repräsentativität der im HPWL gemessenen Güteparameter pH-Wert, Leitfähigkeit und BSB wurden Vergleichsmessungen und Sonderbeprobungen durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es, Informationen darüber zu bekommen, ob die vom Meßgerät und Datenerfassungssystem registrierten Meßwerte auch die tatsächlich im Pumpensumpf vorhandenen Verhältnisse repräsentieren.

Die Überprüfung der Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit erfolgte bei Schmutzwasserabfluß durch Parallelmessung mit kalibrierten, mobilen Sonden im Pumpensumpf. Gleichzeitig wurde der Meßwert des Datenerfassungssystems registriert.

Mit den mobilen Sonden wurde im Pumpensumpf ein Raster von Meßpunkten über die gesamte Höhe und Breite des Sumpfes aufgenommen. Es zeigte sich, daß keine Differenzen auftraten und die pH- und Leitfähigkeitsmeßwerte im gesamten Pumpensumpf konstant waren.

Der pH-Wert zwischen mobiler Sonde und Meßgerät im HPWL stimmt exakt überein, die Leitfähigkeitswerte zeigen Abweichungen, wobei das Leitfähigkeitsmeßgerät im HPWL zu hohe Werte anzeigt (s. Tab. 8).

Tab. 8: Repräsentativität der pH-Wert- und Leitfähigkeitsmessung

	Anzeige HPWL	Mobile Sonde
pH-Wert	8,05	8,04
Leitfähigkeit [mS/cm]	1,42	1,24

Die Untersuchungen zur Repräsentativität der BSB-M3-Messung erfolgten bei Schmutzwasserabfluß und bei Mischwasserabfluß. Hierzu wurden zeitgleich aus dem Pumpensumpf und dem Zulauf zum BSB-M3-Gerät 10-Minuten-Mischproben entnommen. Gleichzeitig wurde der BSB-M3-Meßwert registriert. Die Proben wurden im Labor auf BSB<sub>5</sub> analysiert (bei den Schmutzwasserproben Mehrfachanalyse) und den BSB-M3-Werte gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Schmutzwasserbeprobung zeigt Tabelle 9. Die Beprobung fand statt am 27.10.1993. Es wurden zwei Versuche durchgeführt. Die BSB-M3-Werte sind etwas größer als die BSB<sub>5</sub>-Werte im Pumpensumpf und in der Zulaufleitung zum Gerät. Unter Berücksichtigung der Ungenauigkeiten bei der BSB<sub>5</sub>-Bestimmung

(bis zu 20% Laborfehler) und den 5% Meßfehler bei der BSB-M3-Messung kann aber keine systematischen Abweichung festgestellt werden.

Tab. 9: Repräsentativitätsuntersuchung der BSB-M3-Messung bei Schmutzwasserabfluß (27.10.1993)

Probenahmeort	Pumpensumpf (in Höhe Gebäudeausgang) BSB <sub>5</sub> [mg/l]	Zulauf BSB-M3-Gerät (hinter dem Grobfilter) BSB <sub>5</sub> [mg/l]	Meßwert BSB-M3 [mg/l]
Versuch 1	502	430	582
	528	409	
	522	428	
	525	407	
	528	400	
	521	415	
	Mittelwert: 521	Mittelwert: 414	
Versuch 2	526	500	575
	526	488	
	526	526	
	522	510	
	512	511	
	522	507	
	Mittelwert: 522	Mittelwert: 507	

Die Beprobung bei Mischwasserabfluß wurde nach dem gleichen, oben beschriebenen Muster während eines Niederschlag-Abfluß-Ereignisses am 4.5.1994 durchgeführt. Die BSB<sub>5</sub>-Analyseergebnisse und die BSB-M3-Meßwerte zeigt Tabelle 10.

Die BSB<sub>5</sub>-Werte im Pumpensumpf und in der Zulaufleitung unmittelbar vor dem BSB-M3-Gerät weisen weitestgehend eine Übereinstimmung auf. Die Verhältnisse in der Zulaufleitung und damit auch im Probenstrom des BSB-M3-Gerätes entsprechen somit den Verhältnissen im Pumpensumpf.

Die Differenzen die bei der Gegenüberstellung in Tabelle 10 zwischen den BSB-M3-Werten und den BSB<sub>5</sub>-Werten auftreten, dürften im wesentlichen auf die zeitliche Verzögerung der BSB-M3-Meßwerte zurückzuführen sein. Qualitativ zeigen beide Größen den gleichen abnehmenden Verlauf. Eine Verschiebung der BSB-M3-Werte um einen Verzögerungszeitfaktor würden die Differenzen bis auf die üblichen, oben beschriebenen Meßfehler reduzieren.

Tab. 10: Repräsentativitätsuntersuchung der BSB-M3-Messung bei Mischwasserabfluß (4.5.1994)

Uhrzeit	Pumpensumpf BSB <sub>5</sub> [mg/l]	Zulauf BSB-M3-Gerät BSB <sub>5</sub> [mg/l]	Meßwert BSB-M3 [mg/l]
13:00 - 13:10	236	203	345
13:10 - 13:20	220	240	296
13:20 - 13:30	204	218	261
13:30 - 13:40	183	190	237
13:40 - 13:50	163	182	219
13:50 - 14:00	163	128	200
14:00 - 14:10	171	149	190
14:10 - 14:20	155	164	183
14:20 - 14:30	143	142	177
14:30 - 14:40	132	131	172

### 3. Ermittlung des Zusammenhangs zwischen BSB und anderen Güteparametern - Untersuchung von Leitparametern

Leitparameter stehen in einem engen Zusammenhang zu anderen Verschmutzungsparametern. Vor dem Hintergrund zweier Fragestellungen wurde vorliegendes Datenmaterial auf Leitparameter hin untersucht.

- Können aus Leitparametern mittels Regressionsbeziehungen die Werte anderer Parameter, in diesem Fall der BSB berechnet werden ?
- Existieren on line meßbare Leitparameter, die zu Steuerungszwecken herangezogen werden können?

Als einfach kontinuierlich meßbare Leitparameter sind häufig Leitfähigkeit und Trübung in der Diskussion. Auch der CSB ist mittlerweile betriebsfreundlich durch robuste Gerätschaften im on line Betrieb meßbar. Die Parameter Leitfähigkeit und CSB wurden zur Untersuchung ausgewählt. Trübungsmeßdaten standen nicht zur Verfügung.

Der ebenfalls am HPWL gemessene Güteparameter pH-Wert wird allgemein als nicht geeigneter Leitparameter für den BSB betrachtet. Eine Untersuchung des pH-Wertes an Trockenwetter- und Regenwettertagen bestätigte diese Annahme. In Bild 22 ist beispielhaft für einen Trockenwettertag der Verlauf der drei am HPWL gemessenen Güteparameter Leitfähigkeit, pH-Wert und BSB-M3 dargestellt.

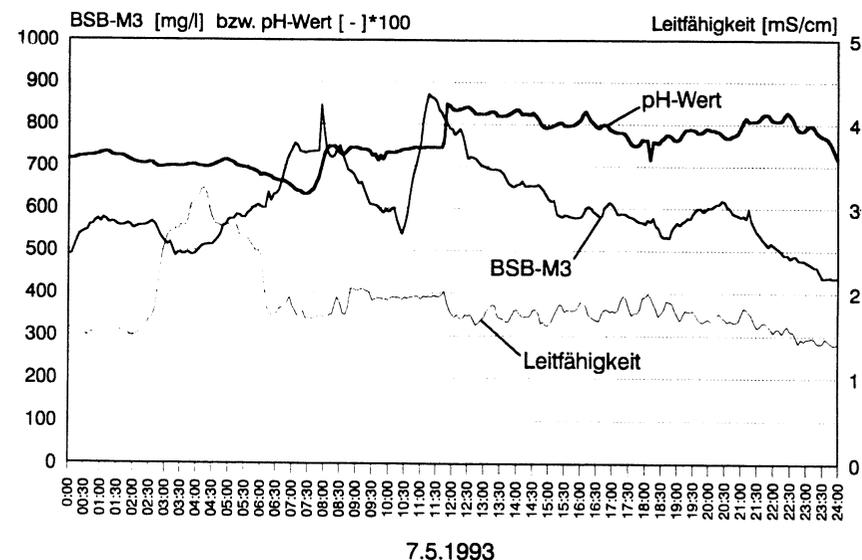


Bild 22: Verlauf der drei Güteparameter an einem Trockenwettertag

Alle drei Parameter zeigen einen voneinander unabhängigen Verlauf. Der pH-Wert ist relativ konstant in einem Bereich von  $\text{pH}=6,5-8,5$ .

Bei Regenwetter (siehe Bild 23) zeigen BSB-M3 und Leitfähigkeit den gleichen abnehmenden Verlauf, während der pH-Wert auf seinem Trockenwetterniveau bei  $\text{pH}=7$  verharrt. Der offensichtlich zwischen der Leitfähigkeit und dem BSB vorhandene Zusammenhang ist beim pH-Wert nicht zu erkennen. Eine Verwendung des pH-Wertes als Leitparameter für den BSB ist somit nicht möglich. Dieses wird indirekt auch bei Betrachtung der Funktionstüchtigkeit des BSB-M3-Gerätes bestätigt. Nach Angaben der Fa. STIP arbeitet das Gerät in einem pH-Wert-Bereich von  $\text{pH}=4$  bis  $\text{pH}=10$  ohne das Beeinträchtigungen in der Biologie des Bioreaktors auftreten.

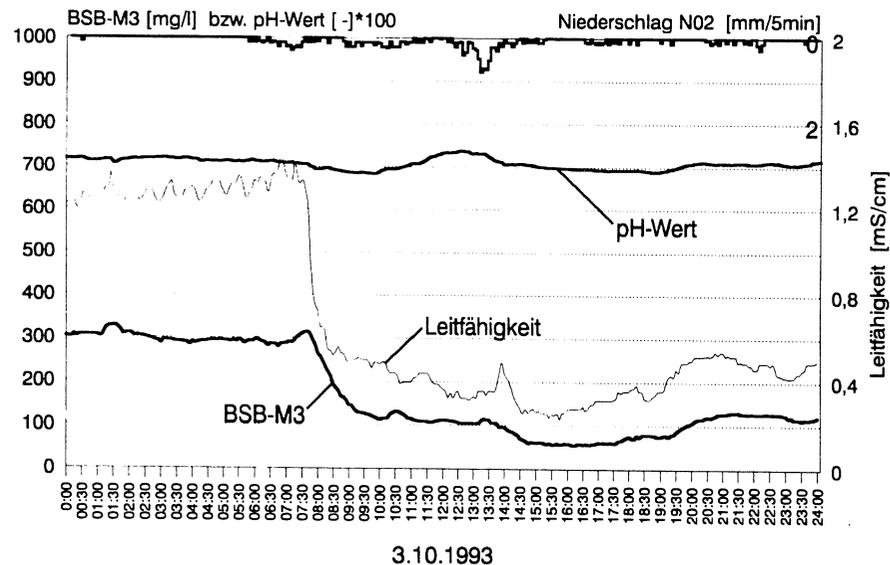


Bild 23: Verlauf der drei Güteparameter an einem Regenwettertag

Für eine detailliertere Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Leitfähigkeit und dem BSB wurden als Datenmaterial die Leitfähigkeits-, BSB-M3-Meßwerte, und die BSB<sub>5</sub>-Laborergebnisse der Regenwetterbeprobungen am HPWL statistisch ausgewertet. Die Untersuchung wurde für ausgewählte Tage, getrennt nach Tagen mit Schmutzwasser- und Mischwasserabfluß, und für die beprobten Niederschlagsereignisse durchgeführt.

Für die Untersuchung des Leitparameters CSB standen als Daten Analyseergebnisse von Mischwasserproben aus dem Einzugsgebiet Bremen-Horn zur Verfügung. Die Daten stammen aus einer Untersuchung des Instituts für Wasserwirtschaft, Universität Hannover (A. Durchschlag) am Beckenzulauf des RÜB.

Vor den Regressionsrechnungen wurden die zeitlichen Konzentrationsverläufe verglichen, um eventuelle zeitliche Verschiebungen zwischen den Ganglinien einzelner Güteparameter als Ursache für schlechte Korrelationen ausschließen zu können. Als Ansatz wurde die einfache lineare Regression mit zwei Variablen gewählt, wobei die Leitfähigkeit bzw. der CSB die unabhängige Variablen sind. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 11 bis 14 sowie den Bildern 22 bis 32 zusammengefaßt. Die Tabellen enthalten für die zwei untersuchten Leitparameter die Größen der linearen Regressionsfunktion, den Korrelationskoeffizienten sowie das 95%-Prognoseintervall.

Der Korrelationskoeffizient  $r$  ist ein Maß für die Abhängigkeit der beiden Variablen und liegt zwischen 0 und 1. Bei einem Korrelationskoeffizienten  $r=1$  besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang, bei  $r=0$  kein Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen. Ab  $r=0,5$  kann man von einem schwachen Zusammenhang, ab  $r=0,75$  von einem deutlichen Zusammenhang sprechen.

Das 95%-Konfidenzintervall gibt den Bereich an, in dem die wahre Regressionsgerade (ermittelt für die Grundgesamtheit aller möglichen Werte) mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegen wird.

Das 95%-Prognoseintervall gibt einen Bereich um den mit der Regressionsfunktion berechneten Wert an, in dem der Wahre Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegt. Mit dem Prognoseintervall können somit die zu berücksichtigenden Unsicherheiten bei der Berechnung des BSB mit einem Leitparameter quantifiziert werden.

Die Grafiken zeigen die Regressionsgerade, das 95%-Konfidenzintervall der Regressionsfunktion (innere gestrichelte Linie) und das 95%-Prognoseintervall (äußere gestrichelte Linie).

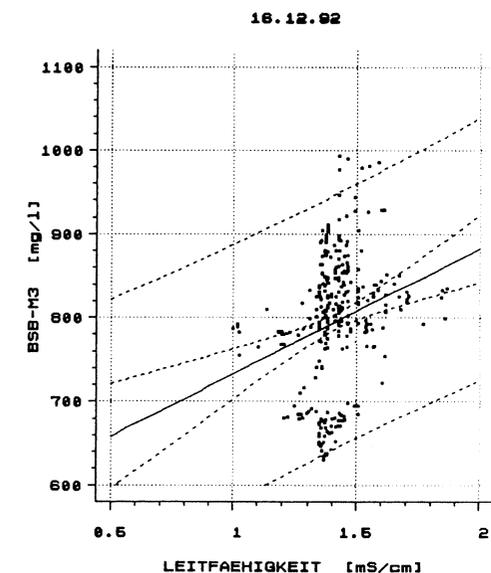
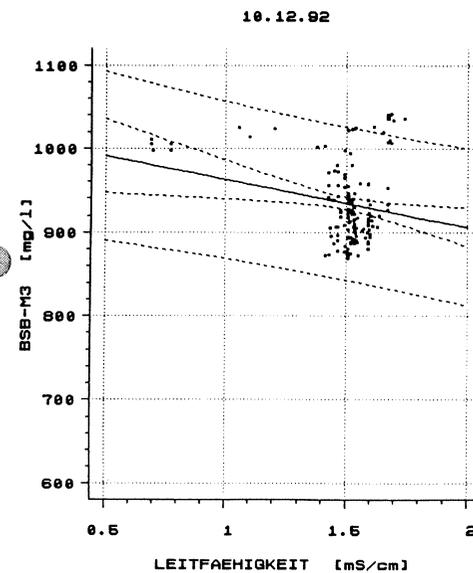
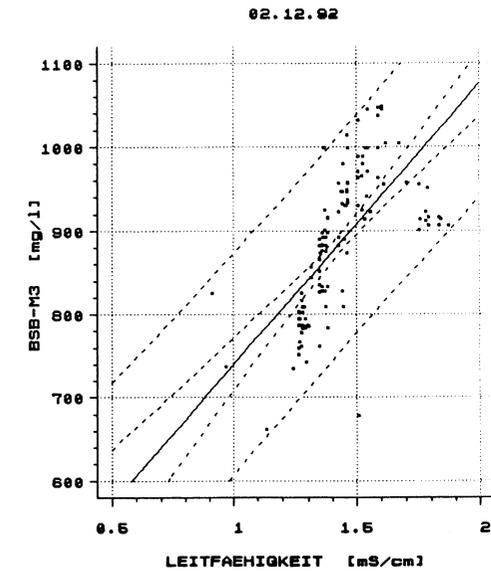
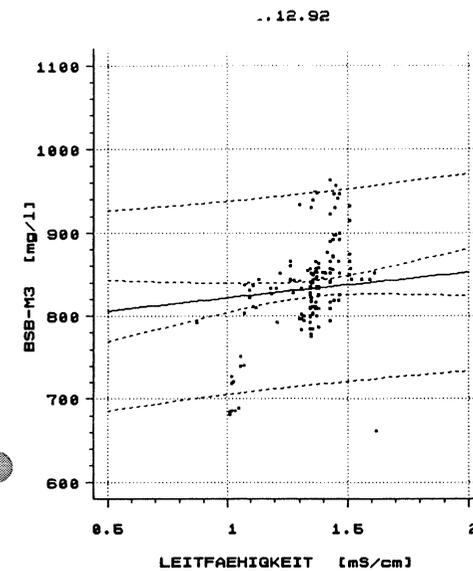
Zunächst wurde der Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 untersucht. Die Ganglinien von Leitfähigkeit und BSB-M3 zeigen bei einsetzendem Niederschlag häufig den gleichen abnehmenden Verlauf. Dieses Verhalten ist zu begründen mit der Verdünnung des Schmutzwassers mit Regenwasser, was sowohl eine Abnahme der organischen Belastung, als auch der Ionenkonzentration des Abwassers bewirkt. Im Hinblick auf die Eignung der Leitfähigkeit als Leitparameter für den BSB muß dieser rein optisch offensichtlich vorhandene Zusammenhang jedoch statistisch nachgewiesen werden. Nur wenn ein statistisch nachgewiesener Zusammenhang besteht, ist es vertretbar mit einem Regressionsmodell die BSB-Werte mittels der Leitfähigkeit zu berechnen.

Die statistische Auswertung der Meßdaten des HPWL erfolgt getrennt nach Zeiträumen mit Schmutzwasser- und Mischwasserabfluß. Diese Einschränkung ist sinnvoll, da anhand der Ganglinienverläufe nur bei starken Konzentrationsänderungen, d.h. bei Mischwasserabfluß, ein gleiches Verhalten der beiden Größen zu beobachten ist.

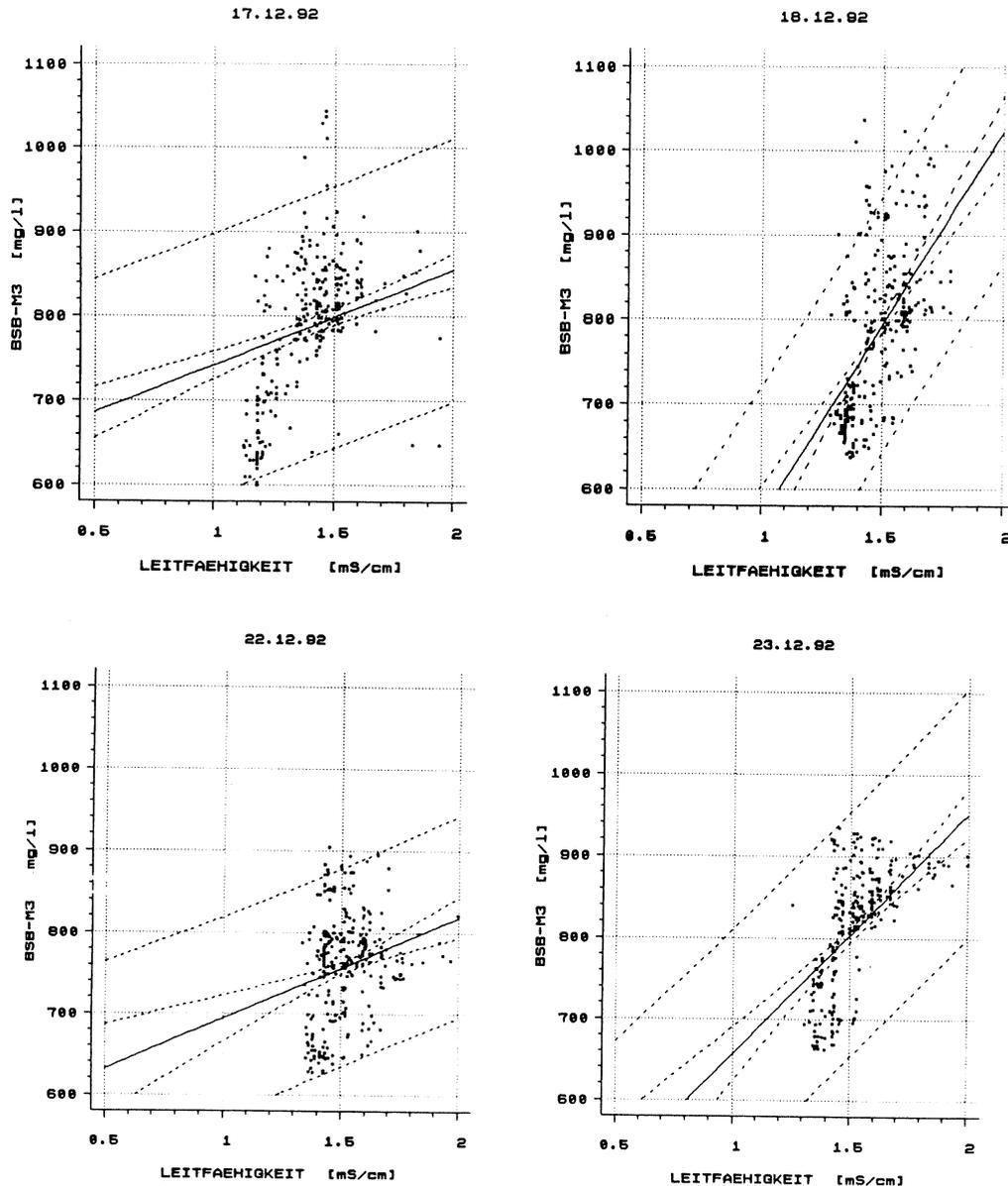
Anhand der Zusammenstellung in Tabelle 11 wird deutlich, daß die Leitfähigkeit bei Tagen mit Schmutzwasserabfluß als Leitparameter wenig geeignet ist. Die Korrelationskoeffizienten sind bei fast allen untersuchten Tagen kleiner als 0,5, so daß kein Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit und BSB-M3 nachzuweisen ist. Die grafische Darstellung der Regressionsgeraden und der Konfidenz- und Prognoseintervalle in den Bildern 22 und 24 zeigt dieses deutlich.

**Tab. 11:** Regressionsbeziehung zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 bei Schmutzwasserabfluß

Korrelation zwischen Leitfähigkeit [mS/cm] und BSB-M3 [mg/l]						
Tage mit Schmutzwasserabfluß						
Datum	Uhrzeit von - bis	Stichproben- umfang	Regressionsgerade		Korrelations- koeffizient	Prognose- intervall [mg/l]
			Steigung	Achsen- abschnitt		
01.12.92	00.00 - 24.00	142	31,0	790,7	0,1234	-
02.12.92	00.00 - 24.00	143	335,0	405,4	0,6556	-
10.12.92	00.00 - 24.00	154	-56,8	1019,7	0,2025	-
16.12.92	00.00 - 24.00	280	149,6	583,3	0,2513	-
17.12.92	00.00 - 24.00	280	112,7	629,5	0,3908	-
18.12.92	00.00 - 24.00	272	458,6	105,8	0,5738	-
22.12.92	00.00 - 24.00	282	124,5	569,3	0,2702	-
23.12.92	00.00 - 24.00	280	294,1	362,4	0,4978	-



**Bild 24:** Ergebnisse der linearen Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 Schmutzwasserabfluß (siehe auch Tabelle 11)



**Bild 25:** Ergebnisse der linearen Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 Schmutzwasserabfluß (siehe auch Tabelle 11)

An Tagen mit Niederschlagsereignissen wurden die Zeitabschnitte mit Mischwasserabfluß am HPWL anhand der Bilder 12-16 in Kapitel 2.2 für die beprobten Niederschlagsereignisse, und für weitere ausgewählte Ereignisse des Dezember 1992 anhand der Tagesganlinien (Anlage 5) ermittelt. Bei den fünf beprobten Mischwasserereignissen wurde bei der Korrelation zwischen den Leitfähigkeits- und den BSB-M3-Werten auch der Verzögerungsfaktor des BSB-M3-Gerätes berücksichtigt. Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung. An den beprobten Mischwassertagen zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 mit Korrelationskoeffizienten größer 0,75.

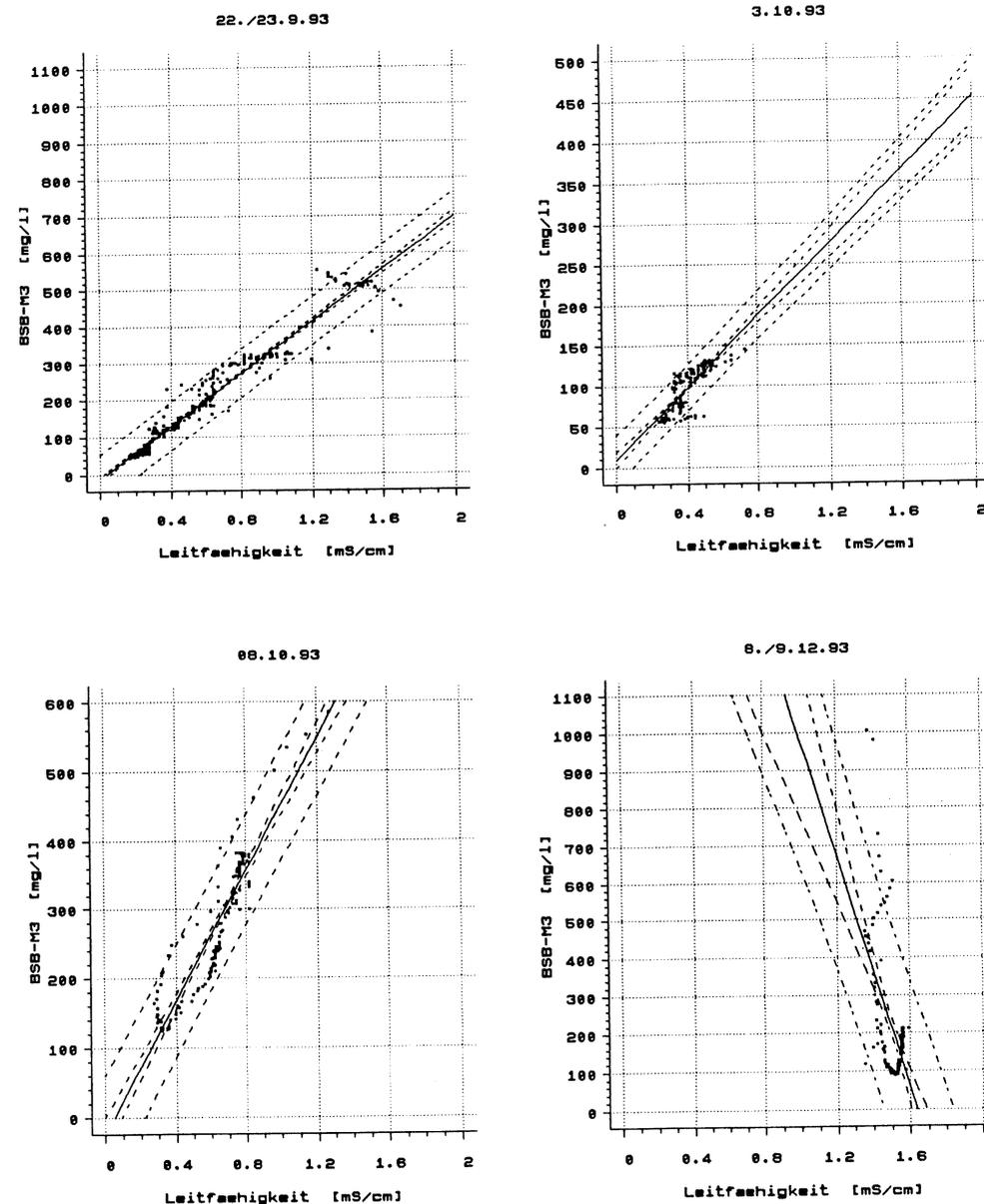
**Tab. 12:** Regressionsbeziehung zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 bei Mischwasserabfluß

Korrelation zwischen Leitfähigkeit [mS/cm] und BSB-M3 [mg/l]						
Zeiträume mit Mischwasserabfluß						
Datum	Uhrzeit von - bis	Stichprobenumfang	Regressionsgerade		Korrelationskoeffizient	Prognoseintervall [mg/l]
			Steigung	Achsenabschnitt		
Beprobte Mischwasserereignisse						
22.9.93	12.00 - 12.00	265	355,9	-13,1	0,9705	±75
3.10.93	8.00 - 24.00	170	221,9	9,1	0,8367	±40
8.10.93	12.00 - 24.00	133	475,9	-23,5	0,9144	±80
8.12.93 1	19.00 - 12.00	144	-1541,7	2524,7	0,5305	±300
27.1.94	14.00 - 24.00	102	242,7	30,2	0,5873	±125
27.1.94 2	14.00 - 24.00	92	278,8	7,1	0,8201	±75
Ausgewählte Tage mit Mischwasserabfluß						
11.12.92	14.30 - 24.00	106	278,2	406,3	0,9028	±100
12.12.92	10.00 - 24.00	155	-81,5	300,9	0,1876	±200
13.12.92	0.00 - 24.00	260	97,4	418,3	0,1203	±340
14.12.92	0.00 - 10.00	118	258,2	378,2	0,5961	±140
20.12.92	4.00 - 24.00	221	541,4	-58,9	0,8076	±160

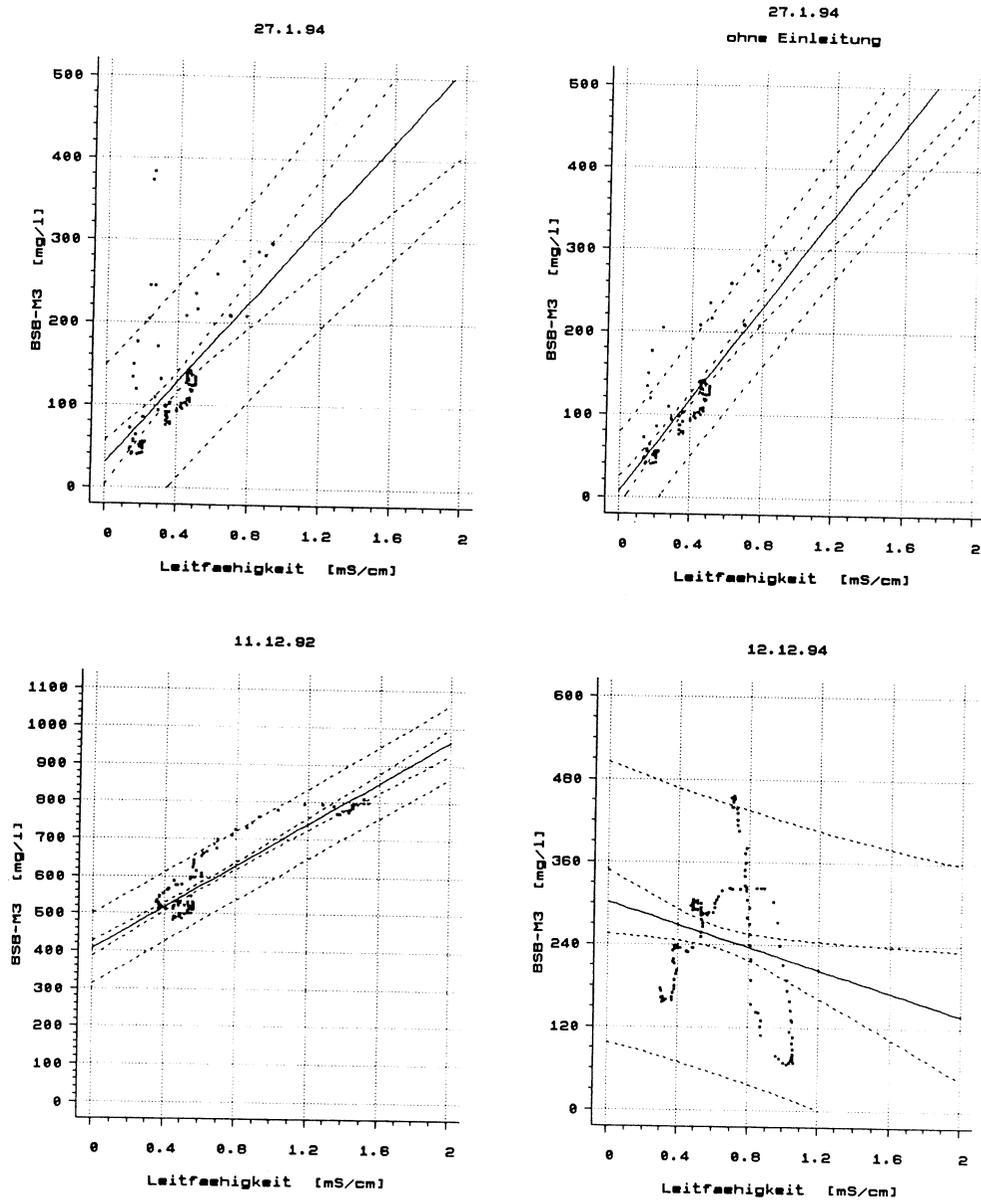
- 1 Leitfähigkeitssonde wahrscheinlich defekt
- 2 Einleitung wurde nicht berücksichtigt

Am 8.12.1993 war offensichtlich die Leitfähigkeitssonde defekt, da der Meßwert über den gesamten Tag konstant war (s. Kap. 2.2, Bild 15). Dieses erklärt den relativ kleinen Korrelationskoeffizienten von  $r=0,5305$ . Der ebenfalls kleine Korrelationskoeffizient am 27.1.1994 hat seine Ursache in einer Einleitung in das Kanalnetz, die sich als BSB-Konzentrationsspitze bemerkbar macht. Wird der Zeitabschnitt, in der die Einleitung stattgefunden hat, aus der statistischen Auswertung herausgenommen, ergibt sich ein deutlich höherer Korrelationskoeffizient (s. Tab. 12). Dieses Beispiel zeigt eine Grenze auf, bei der die BSB-Bestimmung mittels der Leitgröße Leitfähigkeit offensichtlich versagt. Auch an anderen Tagen mit Einleitungen von hohen BSB-Konzentrationen wurden diese Spitzen im Leitfähigkeitsverlauf nicht nachgebildet.

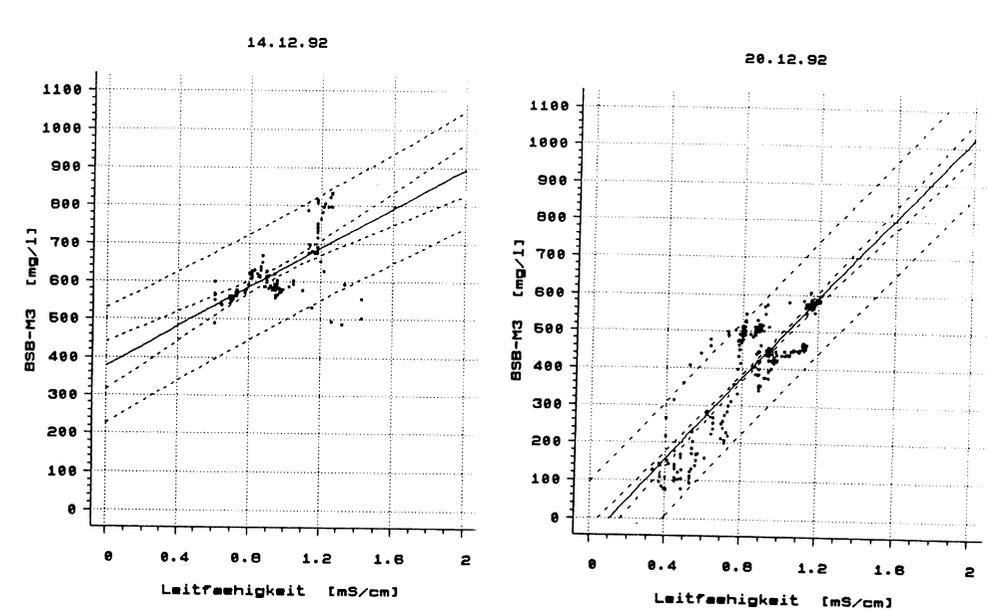
Die Untersuchung weiterer ausgewählter Tage mit Mischwasserabfluß (untersucht wurde der Dezember 1992; s. Anlage 5) ergibt Korrelationskoeffizienten zwischen 0,12 und 0,90, so daß kein einheitliches Ergebnis vorliegt. Es muß allerdings beachtet werden, daß bei diesen Tagen eine mögliche Zeitverzögerung bei den BSB-M3-Werte nicht berücksichtigt wird. Auffällig ist auch, daß bei einigen Niederschlagsereignissen (z.B. 12.12.1992 in Anlage 5) die Ganglinien einen konträren Verlauf zeigen. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten kann Weserwasser sein, das in das Kanalnetz gelangte und aufgrund seines Salzgehaltes eine Erhöhung der Leitfähigkeit bewirkte. Die relativ breite Streuung der Korrelationskoeffizienten würde dadurch auch erklärt werden. Die Bilder 25-27 zeigen die Regressionsgerade und die statistischen Kennlinien für die untersuchten Tage.



**Bild 26:** Ergebnisse der linearen Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 Mischwasserabfluß (siehe auch Tabelle 12)



**Bild 27:** Ergebnisse der linearen Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 Mischwasserabfluß (siehe auch Tabelle 12)



**Bild 28:** Ergebnisse der linearen Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 Mischwasserabfluß (siehe auch Tabelle 12)

Ähnlich verhält sich die Leitfähigkeit und der BSB<sub>5</sub>. Betrachtet man jede Beprobung getrennt, ergeben sich Korrelationskoeffizienten zwischen 0,1466 und 0,99705 (s. Tab 13). Bei der Beurteilung der statistischen Ergebnisse muß allerdings die geringe Stichprobengröße (10 Wertepaare) und auch die teilweise geringen Konzentrationsunterschiede der einzelnen Wertepaare (3.10.1993) berücksichtigt werden. Nimmt man als Stichprobe den Datenpool aller beprobten Ereignisse, mit Ausnahme des 8.12.1993 (Sonde defekt), beträgt der Korrelationskoeffizient  $r=0,8421$ .

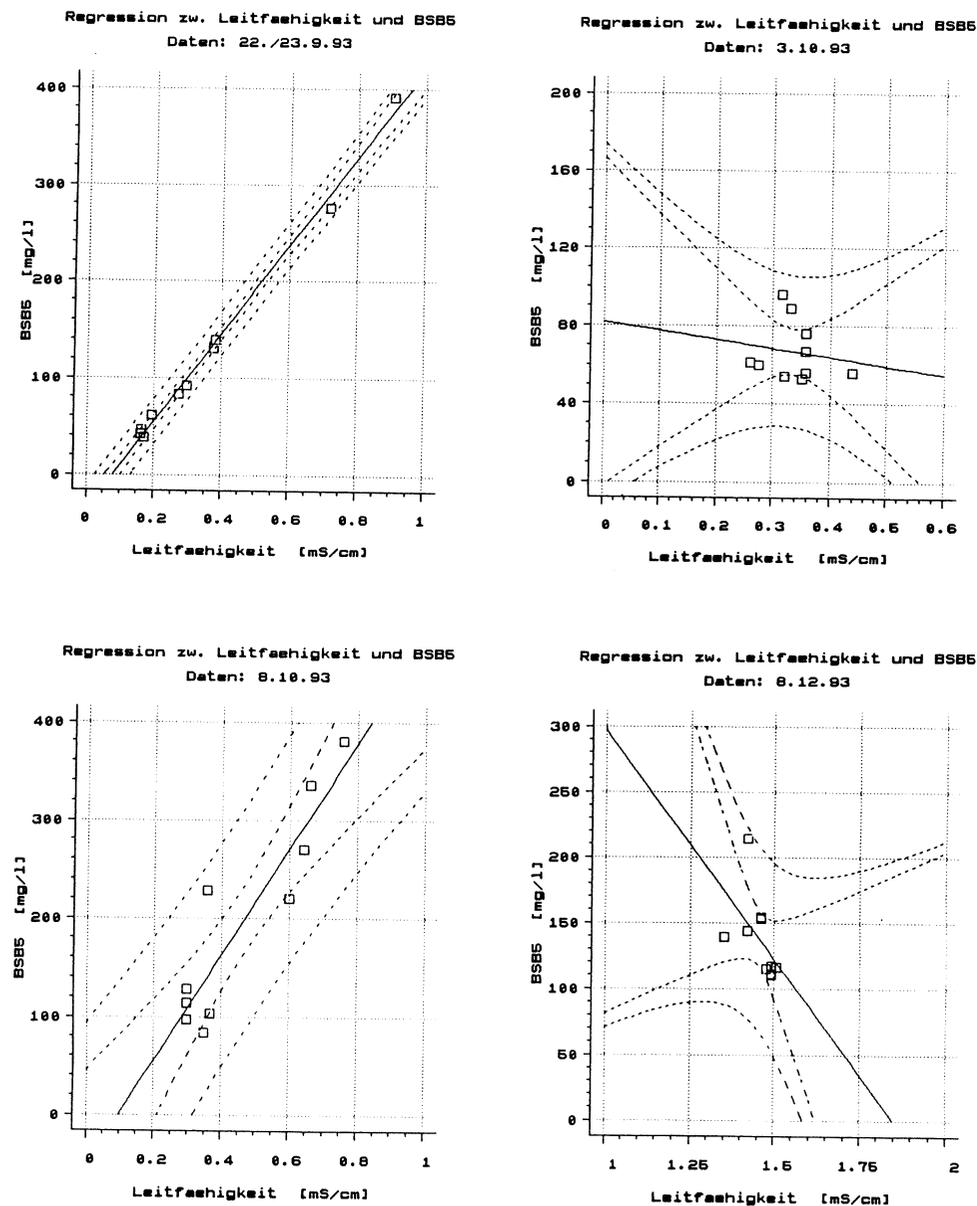
Tab. 13: Regressionsbeziehung zwischen Leitfähigkeit und BSB<sub>5</sub>

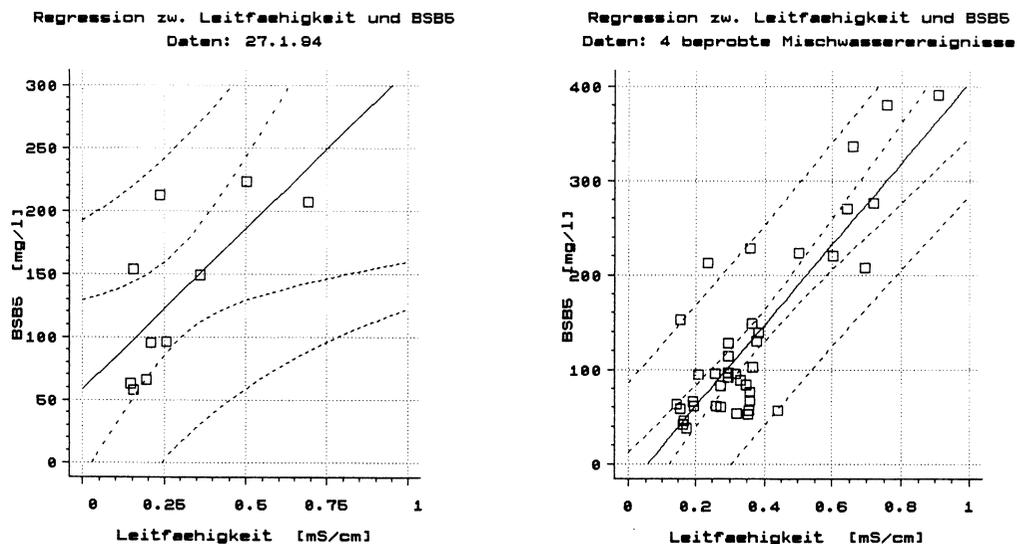
Korrelation zwischen Leitfähigkeit [mS/cm] und BSB <sub>5</sub> [mg/l] Regenwetterbeprobungen					
Datum	Stichprobenumfang	Regressionsgerade		Korrelationskoeffizient	Prognoseintervall [mg/l]
		Steigung	Achsenabschnitt		
22./23.9.93	10	455,9	-36,6	0,9970	±25
3.10.93	10	-45,2	82,0	0,1466	±40
8.10.93	10	538,4	-52,7	0,9104	±125
8.12.93 1	10	-350,3	647,4	0,5189	±60
27.1.94	10	254,7	58,3	0,7026	±90
alle Tage 2	40	428,4	44,4	0,8421	±110

- 1 Leitfähigkeitssonde wahrscheinlich defekt  
2 Vier beprobte Regenwetterereignisse (8.12.93 nicht berücksichtigt)

Eine Berechnung des BSB-M3 bzw. des BSB<sub>5</sub> mittels der Leitfähigkeit ist somit bei Schmutzwasserabfluß überhaupt nicht, bei Mischwasserabfluß nur eingeschränkt bei Vorhandensein bestimmter Randbedingung möglich, wie z.B. keine Industrieleitungen, keine Einleitungen von Weserwasser in das Kanalnetz. Der Einsatz der Leitfähigkeit als Leitparameter ist daher auch nur zu rechtfertigen, wenn diese Einschränkungen berücksichtigt werden. Die Berechnung des BSB mittels der Leitfähigkeit bleibt aber selbst dann noch mit Unsicherheiten behaftet, da auch bei den Ereignissen mit hohen Korrelationskoeffizienten teilweise auch die Prognoseintervalle relativ groß sind.

Betrachtet man die Ganglinienverläufe von BSB-M3 und Leitfähigkeit für alle untersuchten Niederschlagsereignisse - das sind 12 Ereignisse - so sind bei 6 Ereignissen Störeinflüsse durch Industrieleitungen oder Weserwasser vorhanden. Der BSB-Konzentrationsverlauf würde somit mittels der Leitfähigkeit nur in 50% aller (untersuchten) Fälle qualitativ richtig wiedergegeben.

Bild 29: Ergebnisse der linearen Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB<sub>5</sub> (siehe auch Tabelle 13)

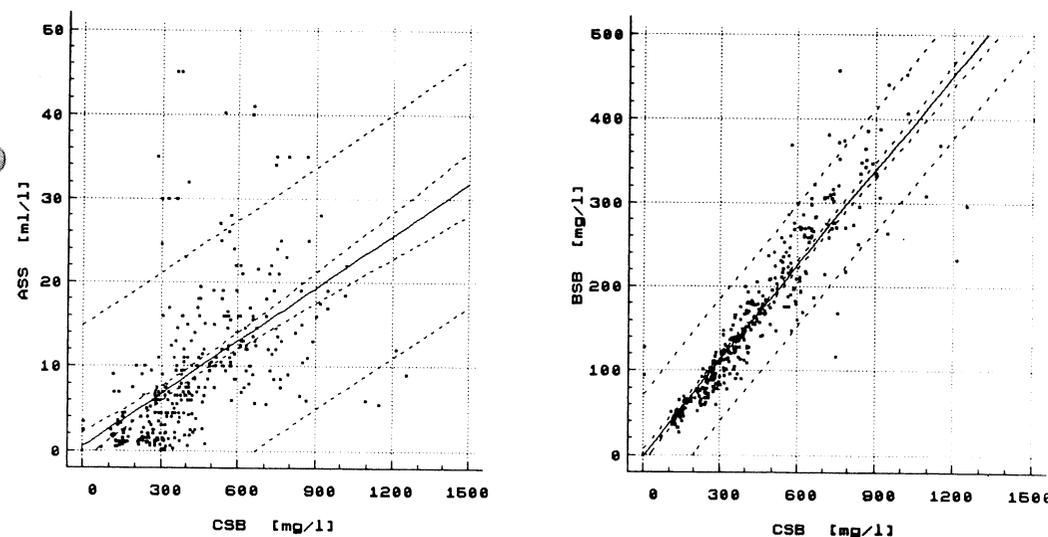


**Bild 30:** Ergebnisse der linearen Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB<sub>5</sub> (siehe auch Tabelle 13)

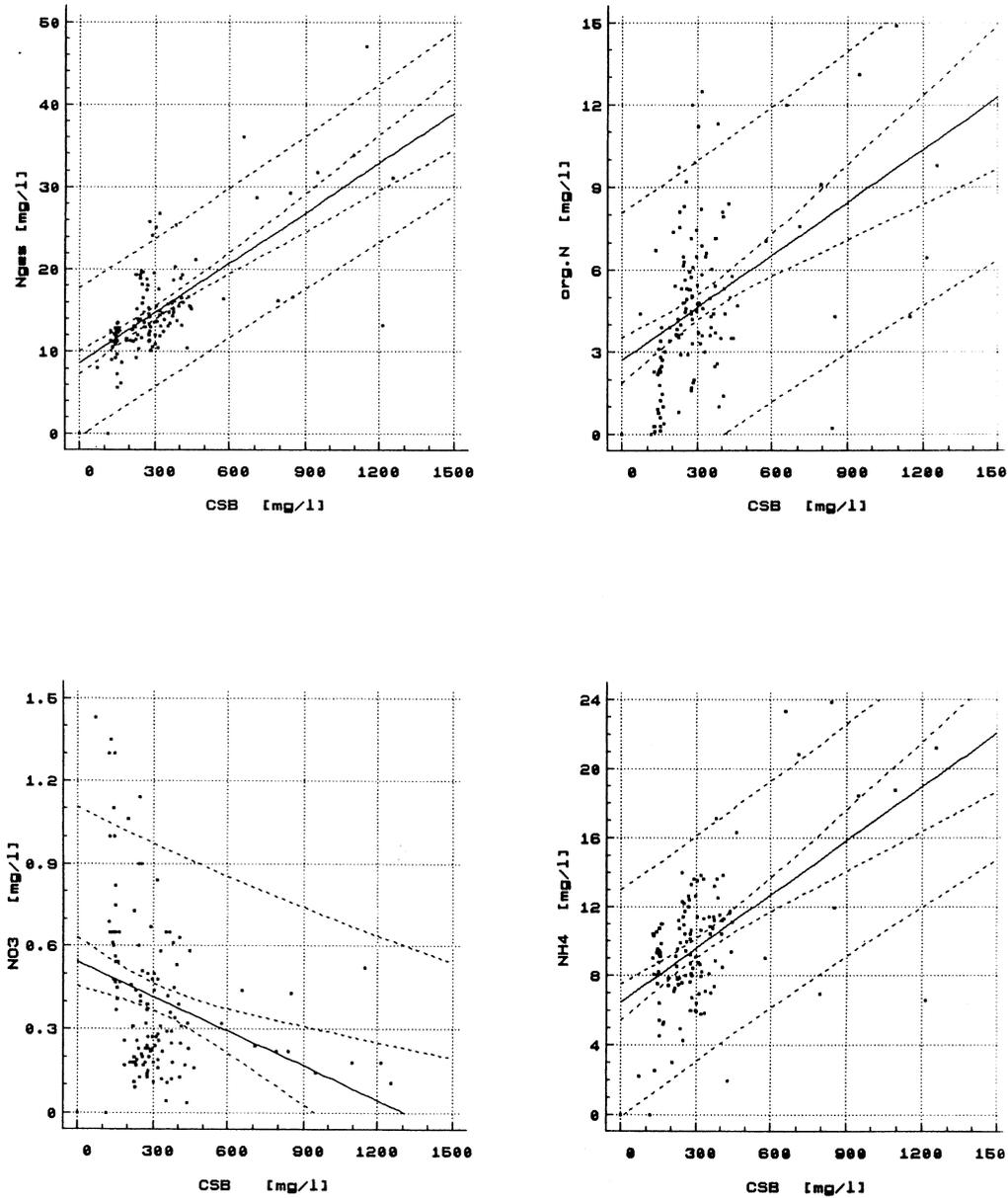
In die Tabelle 14 sind die Ergebnisse der statistischen Untersuchung für den Leitparameter CSB zusammengestellt. Der CSB ist am RÜB Bremen-Horn ein geeigneter Leitparameter für BSB<sub>5</sub>, P<sub>ges</sub> und mit Einschränkungen für AFS, NH<sub>4</sub>, org. N und N<sub>ges</sub>. Ungeeignet ist der CSB als Leitparameter für NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>. Ein kontinuierlich gemessener CSB als Leitparameter für Steuerungszwecke ist nur bedingt einsetzbar. Eine Berechnung von Konzentrationswerten mittels des Leitparameters CSB ist nur für den BSB<sub>5</sub> für Schätzzwecke vertretbar. Auch hier sind aber die Prognoseintervalle relativ groß (± 75 mg/l).

**Tab. 14:** Regressionsbeziehungen zwischen CSB und anderen Schmutzparametern

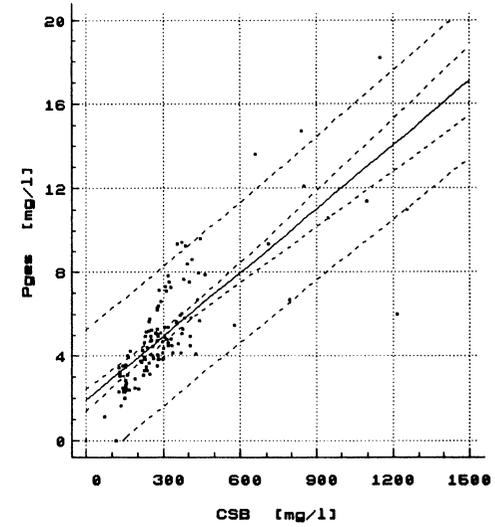
Leitparameter CSB [mg/l]						
Parameter [mg/l]	Beprobungs-ort	Stichproben-umfang	Regressionsgerade		Korrelationskoeffizient	Prognoseintervall [mg/l]
			Steigung	Achsenabschnitt		
BSB <sub>5</sub>	Bremen-Horn	348	0,3762	-0,6298	0,9163	± 75
NO <sub>3</sub>	Bremen-Horn	126	-0,00041	0,5422	-0,3022	± 0,5
NH <sub>4</sub>	Bremen-Horn	126	0,0104	6,4359	0,5398	± 6,5
P <sub>ges</sub>	Bremen-Horn	126	0,0101	1,9110	0,7912	± 3,5
org.N	Bremen-Horn	126	0,0063	2,70688	0,4549	± 5,5
N <sub>ges</sub>	Bremen-Horn	126	0,0202	8,6601	0,6915	± 9
ASS [ml/l]	Bremen-Horn	348	0,0209	0,4699	0,5428	± 15 [ml/l]



**Bild 31:** Ergebnisse der linearen Regression zwischen dem Leitparameter CSB und anderen Schmutzparametern (Bremen-Horn) (siehe auch Tabelle 14)



**Bild 32:** Ergebnisse der linearen Regression zwischen dem Leitparameter CSB und anderen Schmutzparametern (Bremen-Horn) (siehe auch Tabelle 14)



**Bild 33:** Ergebnisse der linearen Regression zwischen dem Leitparameter CSB und anderen Schmutzparametern (Bremen-Horn) (siehe auch Tabelle 14)

# Güteorientierte Abflußsteuerung in Bremen-Linkes-Weserufer

## Abschlußbericht Teil II

### Erweitertes Steuerungskonzept

Auftraggeber: Bremer Entsorgungsbetriebe, vertreten durch  
Herrn Dipl.-Ing. Albrecht (Projektleiter)  
Herrn Dipl.-Ing. Broll-Bickhardt

Bearbeitung: **ifs** Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH

Hannover, den 5.8.1994



Dr.-Ing. A. Khelil

## 4. Entwicklung eines Notfallsteuerungskonzeptes

### 4.1 Allgemeine Zielsetzung des Vorhabens

#### 4.1.1 Erweiterung des Steuerungskonzeptes

Von April bis Oktober 1992 wurde im Entwässerungssystem Bremen-Linkes-Weserufer das Steuerungskonzept überarbeitet und im Expertensystem implementiert (KHELIL (1992)).

Nach diesem Steuerungskonzept werden vom on line implementierten Expertensystem Empfehlungen erzeugt, die dem Maschinisten die Bestimmung einer geeigneten Steuerungsstrategie bei Regenwetterbetrieb erleichtern sollen. In kritischen Situationen schlägt das Expertensystem Steuerungsaktionen vor (z.B. Befüllung von Becken, Entlastung, erhöhte Förderung), deren Durchführung dem Maschinisten überlassen bleibt (halbautomatische Steuerung) (vgl. IAWPRC (1989)).

Die Steuerungsstrategie beruht im wesentlichen auf einer mengenmäßigen Betrachtung des Kanalzustandes (Wasserstände, Durchflüsse). Der Güteaspekt bleibt weitgehend unbeachtet. Das Expertensystem erzeugt lediglich eine allgemeine Warnung, wenn eine oder mehrere Grenzwerte der Güteparameter überschritten werden.

*Ziel des vorliegenden Vorhabens ist es, die vom Datenerfassungssystem aufgenommenen Güteinformationen in größerem Maße als bisher in den Entscheidungsprozeß einfließen zu lassen.*

In Tab. 15 sind die Güteparameter aufgelistet, die im Juni 1993 im Pumpensumpf des HPWL kontinuierlich gemessen werden.

Tab. 15: Liste der gemessenen Güteparameter

pH	(-)	Abwassermessung
Leitfähigkeit	(mS/cm)	Abwassermessung
BSB-M3	(mg/l)	Abwassermessung
Ex-Gas	(%-UEG)	Luftmessung
Schwefelwasserstoff	(ppm)	Luftmessung
Sauerstoff	(V/V%)	Luftmessung

#### 4.1.2 Schwierigkeiten der Gütemessungen

Die kontinuierliche Erfassung und Aufbereitung der Gütemeßwerte ist mit Schwierigkeiten verbunden.

- Zum einen treten bei allen Güteparametern bis auf den pH-Wert störungsbedingte *Schwankungen* auf. Nach eingehender Prüfung der elektrischen Installationen und Übertragungswege sowie Einbau zusätzlicher Datenfilter konnten diese Schwankungen zwar erheblich reduziert, jedoch nicht vollständig ausgeräumt werden. Die Untersuchung des zwischen dem 01.07.1992 und dem 31.12.1992 aufgenommenen Datenmaterial (vgl. KHELIL (1993)) dokumentiert diese Entwicklungen und zeigt die Notwendigkeit einer zusätzlichen Verarbeitung der Gütedaten zur Lösung des Schwankungsproblems.
- Zum anderen soll die Gültigkeit und Repräsentativität des im Pumpensumpf gemessenen *Biochemischen Sauerstoff-Bedarfs (BSB-M3)* durch Parallelmessung des BSB<sub>5</sub> im Trockenwetter- und im Regenwetterfall untersucht werden (vgl. Abschlußbericht Teil I).

Der BSB ist ein Summenparameter. Er entspricht der Sauerstoffmenge (mg/l), die durch mikrobielle Stoffwechselprozesse beim Abbau der Schmutzstoffe im aeroben Milieu bei +20°C in fünf Tagen verbraucht wird. Gerade die Kenntnis über den Anteil an *biologisch* (leicht) abbaubaren Stoffen im Abwasser bzw. Mischwasser liefert eine wertvolle Information zur Beurteilung der Auswirkungen des Abwasserzuflusses auf die Kläranlage oder von Mischwassereinleitungen auf das Gewässer (MUDRACK; KUNST (1991)).

Im Pumpensumpf des HPWL wird eine kontinuierliche Kurzzeit-BSB-Messung eingesetzt. Statt den BSB-Wert nach fünf Tagen zu bestimmen, wird nach drei Minuten ein Wert geliefert. Das von der Firma STIP entwickelte Gerät (SIEPMANN (1992)) basiert auf einem Verfahren, bei dem Mikroorganismen den Meßgerätecomputer steuern. Hierzu wird das Abwasser kontinuierlich in das Meßgerät gefördert, gefiltert und dann in einem Regelkreis immer so weit verdünnt, daß die Biologie stets mit gleicher Abwasserkonzentration als Nahrung versorgt wird. Nach Angabe der Firma liefert das Gerät, *wenn regelmäßig gewartet*, zuverlässige Messungen, die mit Hilfe einer Übertragungsberechnung entsprechende BSB<sub>5</sub>-Werte darstellen.

Zur Prüfung der Gültigkeit und Repräsentativität der BSB-M3-Meßwerte im HPWL wurden verschiedene Untersuchungen unter Laborbedingungen und im praktischen Meßeinsatz durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Teil 1 dieses Abschlußberichtes beschrieben.

#### 4.1.3 Vorteile der Gütebetrachtung

Die Berücksichtigung der Güteparameter verspricht eine Verbesserung des automatischen Entscheidungsprozesses in einigen Punkten.

- Die *Betriebssicherheit* im HPWL wird besser als bisher in den automatischen Entscheidungsprozeß erfaßt. Dazu werden die Parameter Explosionsgefahr (Ex-Gas), Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>), die unmittelbar über dem Wasserspiegel im Pumpensumpf gemessen werden, ausgewertet. Wenn entsprechende Grenzwerte überschritten werden, besteht eine Gefahr für das Betriebspersonal. Geeignete Maßnahmen reichen vom Arbeitsverbot im Gerinne (z.B. Reparatur-, Reinigungsarbeiten) bis zur Einstellung des gesamten Förderbetriebes im Pumpwerk.
- Die anderen drei Güteparameter (pH, Leitfähigkeit, BSB-M3) charakterisieren die Abwasserbeschaffenheit. Ihre erstmalige Berücksichtigung in der automatischen Strategiebestimmung soll anhand von verschiedenen Steuerungsmaßnahmen zum erhöhten Umweltschutz beitragen. Diese Maßnahmen werden folgenden Bereichen zugeordnet: *Notfallstrategie, Trockenwetterstrategie, Regenwetterstrategie*.

Die biologische *Reinigungsleistung* der Kläranlage hängt entscheidend davon ab, ob stabile Lebensbedingungen für die Biozönose gewährleistet sind. In konstantem Milieu bauen die Mikroorganismen schneller die ankommenden Schmutzstoffe ab. Auf dieser Überlegung beruhen Notfallstrategie und Trockenwetterstrategie:

- Die Notfallstrategie bezeichnet alle Steuerungsmaßnahmen, die dem Schutz der Kläranlage vor solchen *extremen* (toxischen) Konzentrationsspitzen dienen, die zu einem Ausfall der biologischen Reinigungsstufe auf der Kläranlage führen könnten.
- Die Trockenwetterstrategie zielt auf einen möglichst gleichmäßig verteilten Zufluß zur Kläranlage. Unter solchen Bedingungen treten keine hydraulischen Spitzenbelastungen auf, die zu einer Störung der Biozönose führen könnten. Zudem bewirkt eine Vergleichmäßigung der Zuflüsse eine Homogenisierung der Frachtkonzentrationen, so daß stabile Lebensbedingungen für die Biozönose vorhanden sind.

Nach der Regenwetterstrategie wird gesteuert, wenn die Stauraumkapazität im Kanal über das normale Maß ausgelastet wird. Inwieweit eine Gütebetrachtung die Leistungsfähigkeit des gesamten Entwässerungssystems (Kläranlage eingeschlossen) erhöht, hängt vom Auftreten bestimmter physikalischer Vorgänge an der Ein-

zugsgebietsoberfläche (Schmutzakkumulation und -abtrag) und in der Kanalisation (Ablagerung und Remobilisierung) ab. Sowohl an der Oberfläche (GROTTKER (1987)) als auch im Kanal (RISTENPART; UHL (1992)) ist die Dynamik des Schmutztransports noch unzureichend erforscht. Meßprogramme im Labor und in situ werden zur Zeit in mehreren europäischen Ländern (u.a. Deutschland, Frankreich, Großbritannien) zum Verständnis der auftretenden Wechselwirkungen durchgeführt. Modellansätze werden zur Zeit erarbeitet bzw. überprüft.

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens soll für fünf Niederschlag-Abfluß-Ereignisse meßtechnisch erfaßt werden, ob der Schmutztransport (BSB-Konzentration) im Entwässerungssystem Bremen-Linkes-Weserufer bei Regenwetter charakteristische Muster (z.B. "first-flush"-Effekt, "last flush"-Effekt oder sonstige physikalisch begründbare Konzentrationsschwankungen) aufweist, deren Berücksichtigung im Entscheidungsprozeß des Expertensystems eine Verringerung der Frachtlast herbeiführen könnte. Falls solche Muster erkennbar sind, wird das entsprechende *Steuerungspotential* abgeschätzt. Dieses Potential entspricht der maximal zu erwartenden Reduzierung der *Frachtlast* an den Mischwasserüberläufen gegenüber einer mengenmäßigen Betrachtung (Minimierung der *Entlastungsvolumina*). Die Erstellung einer verbesserten Regenwettersteuerungsstrategie hinsichtlich der Fracht ist jedoch nicht Gegenstand dieses Projektes.

## 4.2 Die Betriebssicherheit

### 4.2.1 Charakterisierung eines Vorfalls

Die relevanten Güteparameter zur Prüfung der Betriebssicherheit sind die Explosionsgefahr (**Ex-Gas**), der Schwefelwasserstoff (**H<sub>2</sub>S**) und der Sauerstoff (**O<sub>2</sub>**). Diese Parameter werden in der *Luft* unmittelbar über dem Wasserspiegel im Pumpensumpf des HPWL gemessen. Für jeden Parameter (Ex-gas, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>) werden drei Bereiche bestimmt (vgl. ALBRECHT, 1992). Im Normalfall besteht keine Gefahr für die Betriebssicherheit. Außerhalb des Bereiches "Normalfall" wird ein Bereich "Gefahr" (=GWt1) und ein Bereich "akute Gefahr" (=GWt2) definiert. Vorkehrungsmaßnahmen müssen getroffen werden (vgl. Tab.16), sobald "Gefahr" oder "Akute Gefahr" besteht.

Tab.16: Grenzwerte der Güteparameter zur Betriebssicherheit

Parameter	"Normalfall"	"Gefahr" GWt1	"Akute Gefahr" GWt2
Ex-Gas (%)	0-25	25-50	50-100
H <sub>2</sub> S (ppm)	0-5	5-10	10-50
O <sub>2</sub> (V/V%)	20,95 <sup>(1)</sup>	20,90-19	19-17

(1) Luft besteht zu 20,95 Volumen-% aus Sauerstoff.

### 4.2.2 Steuerungsstrategie zur Betriebsicherheit

Nach der Gefahrenkala bekommt der Parameter **Ex-Gas** erste Priorität, weil das Pumpwerk nicht geschützt ist. Unter Umständen müssen alle Aktivitäten (einschließlich des Förderbetriebes in die Kläranlage) eingestellt werden.

Die Parameter **H<sub>2</sub>S** und **O<sub>2</sub>** sind gleichwertig. Eine Grenzwertüberschreitung bedingt eine Einschränkung des Tätigkeitsfelds des Betriebspersonals (u.a. Geländeabspernung, Arbeitsverbot im Gerinne). Der Pumpenbetrieb wird aber nicht eingeschränkt. Aus diesem Grunde werden spezifische Warnmeldungen für H<sub>2</sub>S und O<sub>2</sub> nur dann erzeugt, wenn keine Explosionsgefahr besteht (vgl. Anlage 6).

Tab.17: Einschränkung des Pumpenbetriebs zur Betriebssicherheit

Parameter	GWt2 = "Gefahr"	GWt3= "Akute Gefahr"
Ex-Gas (%)	Zufluß zur KA wenig Förderung	den gesamten Förderbetrieb in die Kläranlage einstellen
H <sub>2</sub> S (ppm)	-	-
O <sub>2</sub> (V/V %)	-	-

### 4.3 Die Notfallstrategie

#### 4.3.1 Erläuterung der Problematik

Die Güteparameter **pH** (-), **Leitfähigkeit** (mS/cm) und **BSB-M3** (mg/l) liefern wichtige Hinweise über die *Beschaffenheit des Abwassers* bzw. Mischwassers im Pumpensumpf des Pumpwerks HPWL. Die Entwicklung einer Notfallstrategie vollzieht sich in zwei Stufen:

- Zum einen muß der Gefährdungsgrad des der Kläranlage zufließenden Abwassers abgeschätzt werden.
- Zum anderen muß eine geeignete "Steuerungsantwort" entwickelt werden. Bei dieser Überlegung bildet der Regenwetterfall den kritischen Fall, weil die Speicherkapazität dann begrenzt ist. Es müssen daher Prioritäten zwischen den z.T. entgegengesetzten Steuerungszielen (Vermeidung von Überstau, Vermeidung von Entlastungen, Schutz der Kläranlage) gesetzt werden.

### 4.3.2 Charakterisierung einer Notfallsituation

#### 4.3.2.1 Gütezustand im Kanal (vgl. KHELIL (1993))

Der BSB-M3 und die Leitfähigkeit gelten nicht als Parameter zur Beschreibung von gefährlichen Stoffen. Daher werden keine Grenzwerte von vornherein festgelegt. Die Charakterisierung des normalen Wertebereiches liefert jedoch einen wichtigen Hinweis zur Abschätzung einer möglichen Gefährdung der Kläranlage.

- Im Normalfall liegt der BSBM3 im Bereich zwischen 500 und 800 mg/l
- Im Normalfall liegt die Leitfähigkeit im Bereich zwischen 1,2 und 1,5 mS/cm.

In vielen Fällen ist ein ähnlicher Verlauf der beiden Parameter zu verzeichnen (deutet auf lineare Beziehung zwischen BSB-M3 und Leitfähigkeit hin). Dieses Verhältnis kann jedoch durch verschiedenartige Einleitungen (Weserwasser, Industrieanlagen) erheblich gestört werden, so daß für die Gütesteuerung auf keinen der beiden Parameter verzichtet werden kann.

Der pH-Wert wird ebenfalls kontinuierlich gemessen. Auffallend ist, daß der Regenwasserzufluß kaum Einfluß auf den Verlauf der pH-Werte hat, während Einleitungen erhebliche Schwankungen im basischen Bereich verursachen können, auch im Regenwetterfall.

- Im Normalfall liegen die pH-Werte im Bereich zwischen 7 und 9.  
Die Verschiebung in den basischen Bereich ist durch kontinuierliche Einleitungen bedingt.

Es wird davon ausgegangen, daß eine Gefährdung der Biozönose bevorsteht, wenn die pH-Werte außerhalb des folgenden Bereiches liegen: **6,5 < pH < 10,0**.

#### 4.3.2.2 Gütezustand auf der Kläranlage Seehausen

Zur Bewertung des Gefährdungspotentials der einzelnen Güteparameter sind zudem Informationen über den Gütezustand auf der Kläranlage erforderlich (vgl. Tab.18). Detailliertere Daten sind den von der Freien Hansestadt Bremen veröffentlichten

Broschüren zu entnehmen (Freie Hansestadt Bremen (1986); Freie Hansestadt Bremen (1992)).

Tab. 18: Mittelwert der Güteparameter auf der Kläranlage

	Einlauf Vorklärung	Auslauf Nachklärung
BSB5	400 mg/l	12 mg/l
pH	7,4	7,9
Leitfähigkeit	1,3 mS/cm	1,3 mS/cm

Tab. 19: Bilanzierung der mittleren Tagesabflüsse

Vorklärungsbecken	13 200 m <sup>3</sup>
Tagesabfluß(*) aus dem Gebiet Bremen Rechtes Weserufer	98 764 m <sup>3</sup>
Tagesabfluß(*) aus dem Gebiet Bremen Linkes Weserufer	44 257 m <sup>3</sup>
gesamter Tageszufluß(*) nach Seehausen	143 021 m <sup>3</sup>

(\*)Die aufgeführten Tagesabflußvolumina entsprechen mittleren Tageswerten über alle Tage (Trockenwetter- und Regenwettertage) zwischen dem 01.07.1992 und dem 31.12.1992 (KHELIL 1993)).

Eine zusätzliche Pufferung der pH-Wertes unterhalb des Pumpensumpfes HPWL erfolgt einerseits mit dem verfügbaren Speichervolumen im Vorklärbecken und andererseits aus der Mischung mit den Abflüssen vom Gebiet Bremen-Rechtes-Weserufer.

Aus Tab. 19 ergibt sich eine Durchlaufzeit im Vorklärbecken von ca.  $13\,200 / 143\,021 = 0,092$  Tag  $\approx 130$  Min. Falls ein pH-Vorfall auf dem Gebiet Bremen-Linkes-Weserufer eintritt, wird die maximale Wirkung nur dann erreicht, wenn er länger als ca. 2 Stunden dauert.

Der Abfluß aus dem Gebiet Bremen-Rechtes-Weserufer - QRechts - übersteigt im Durchschnitt den Abfluß aus dem Gebiet Bremen-Linkes-Weserufer - QLinks - um mehr als das Zweifache:

$Q_{\text{Rechts}} \approx 2,2 \times Q_{\text{Links}}$  (vgl. KHELIL (1993)).

Falls z.B. der pH-Wert im Gebiet Bremen-Linkes-Weserufer den Grenzwert pH-Wert=11 zwei Stunden überschreitet, während der pH-Wert im

Gebiet Bremen-Rechtes-Weserufer im Bereich pH-Wert = 7,5 bleibt, wird rein rechnerisch der pH-Wert im Vorklärbecken ca. den Wert  $-\log \left[ \frac{10^{-11} + 2,2 \times 10^{-7,5}}{3,2} \right] \approx 7,7$  betragen. Dieses ist eine kaum wahrnehmbare Änderung des pH-Wertes. Nach MUDRACK; KUNST (1991) sind im pH-Bereich [6,0 - 8,5] keine Schwierigkeiten beim Belebungsverfahren zu erwarten, weil sich die Biozönose sowohl durch die Toleranz der einzelnen Arten als auch durch Veränderung des Artenspektrums innerhalb dieser Grenzen anpassen kann. Bei pH-Werten außerhalb dieses Bereiches können aber schlagartige Artenverschiebungen auftreten, die zunächst mit erheblicher Reduzierung der Reinigungswirkung verbunden sind.

#### 4.3.3 Implementierung

##### Vorbemerkung:

Die oben erwähnte Pufferung unterhalb HPWL bildet einen zusätzlichen Schutz der Kläranlage, falls unkontrollierbare indirekte Einleitungen im Teilgebiet Bremen - Linkes-Weserufer auftreten. Im erweiterten Steuerungskonzept sollte sie jedoch unberücksichtigt bleiben, solange ausreichend Speicherkapazität im Kanal Bremen-Linkes-Weserufer vorhanden ist. Diese Annahme gilt nicht zuletzt deshalb, weil die notwendigen Zustandsinformationen (pH-Wert im Vorklärbecken, pH-Wert im Abfluß des Gebietes Bremen-Rechtes-Weserufer) zur Optimierung der Steuerungsstrategie in der Zentrale im Pumpwerk HPWL nicht verfügbar sind.

*Sobald indirekte Einleitungen in den Kanal eine Verschiebung der pH-Werte außerhalb des Bereiches  $6 < \text{pH} < 10$  bewirken, sollten Steuerungsmaßnahmen ergriffen werden, die einen Rückhalt des gefährdenden Abwassers erzielen, bis ein Ausgleich eintritt.*

Um irrelevant kurzfristige Schwankungen auszuschalten, werden nur mittlere pH-Werte über die letzten 10 Minuten berücksichtigt.

Zunächst soll das belastete Abwasser zurückgehalten werden, d.h. die Förderung in die Kläranlage wird reduziert.

1. Der Rückhalt des belasteten Abwassers findet im Kanalstauraum statt, solange keine Überstaugefahr besteht. Es wird erwartet, daß durch Mischung mit dem neu

ankommenden Abwasser der pH-Wert in den normalen Bereich zurückgebracht wird.

2. Ab einer bestimmten (realen oder virtuellen) Kanalstauraumauslastung empfiehlt das Expertensystem *im Normalfall* die maximal zulässige Förderleistung in die Kläranlage. Im pH-Vorfall wird *stattdessen* eine Beckenbefüllung empfohlen. Der Zufluß in die Kläranlage bleibt weiterhin reduziert.

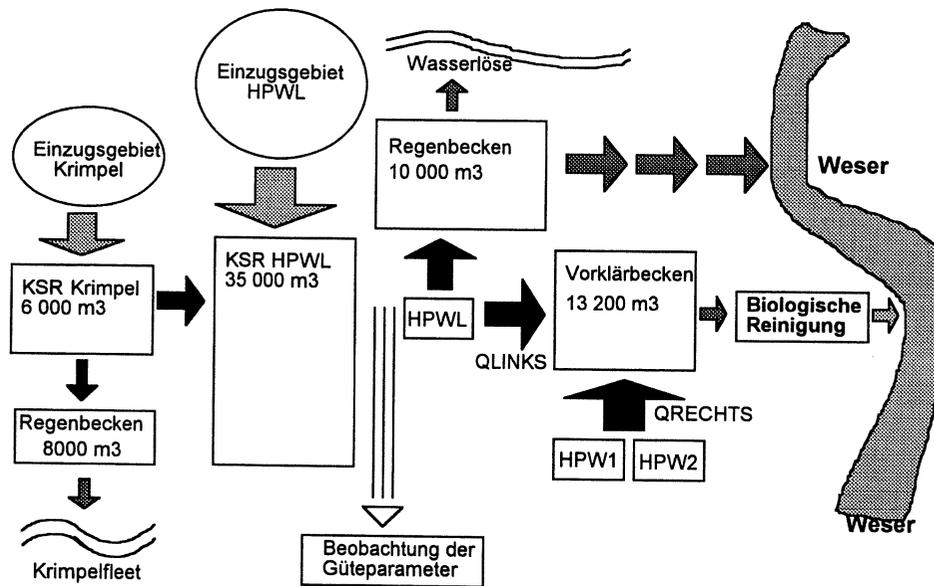


Bild 34: Entwässerungssystem Bremen-Linkes-Weserufer

Wenn zum Zeitpunkt des pH-Vorfalles der Stauraum in HPWL schon so ausgelastet ist, daß im Normalfall eine Beckenbefüllung stattfinden sollte, besteht Überflutungsgefahr. Die Gütebetrachtung wird dann zugunsten der Mengenbetrachtung aufgegeben. Der einzige Unterschied liegt bei einem pH-Vorfall darin, daß die erhöhte (=über die maximal zulässige) Förderung in die KA empfohlen wird, sobald der Beckenbefüllungsgrad mehr als 75% (Becken 1 voll + Becken 2 halb voll) beträgt. Eine vorzeitige Entlastung auf der Kläranlage wird dabei in Kauf genommen. Die Pufferkapazität unterhalb HPWL verringert jedoch das Gefährdungspotential des entlasteten Mischwassers erheblich, das sonst aus HPWL direkt in die Weser gelangen würde (vgl. Anlage 6).

## 5. Entwicklung eines Steuerungskonzeptes zur Vergleichmäßigung des Kläranlagenzuflusses bei Trockenwetter

### 5.1 Charakterisierung der Förderganglinie in HPWL

Die Untersuchung des Datenmaterials über die Periode vom 01.07.1992 bis zum 31.12.1992 hat folgende Ergebnisse ergeben (vgl. KHLEIL (1993)):

Tab.20: Tagesfördermenge im HPWL

Mittlerer Tagesabfluß (*)	44 257 m <sup>3</sup>
Max. Tagesabfluß	91 307 m <sup>3</sup>
Min. Tagesabfluß	24 527 m <sup>3</sup>
Standardabweichung des Tagesabflusses	14 289 m <sup>3</sup>

(\*) Zur Berechnung des Mittelwertes wurden alle Tage (Trockenwetter- und Regenwettertage) herangezogen.

Unabhängig davon wurden die Fördermengen aus HPWL an 76 Trockenwettertagen untersucht.

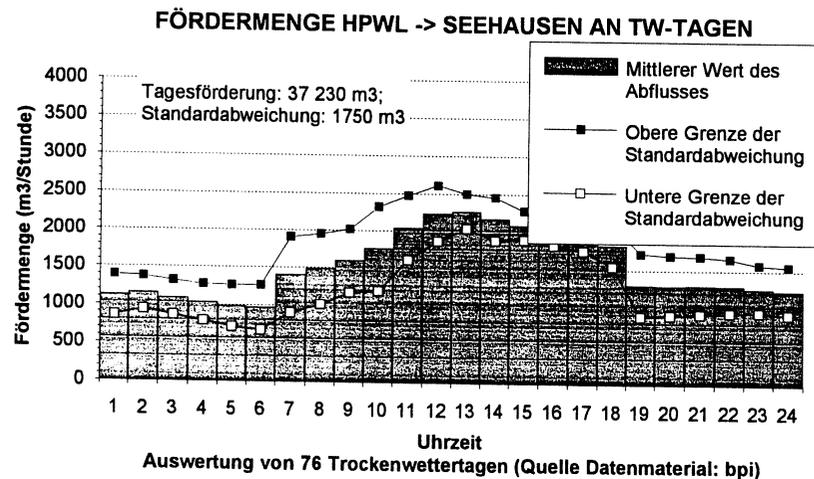


Bild 35: Förderganglinie im HPWL für Trockenwettertage

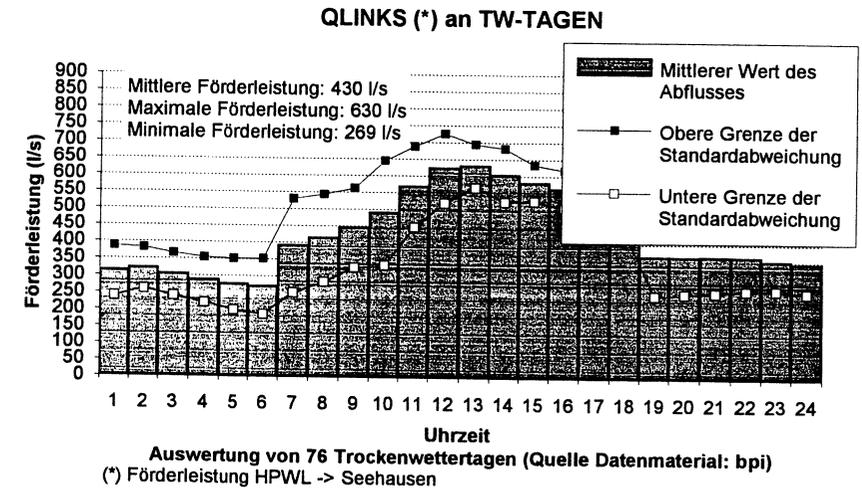


Bild 36: Förderganglinie im HPWL für Trockenwettertage

#### Anmerkung:

Aus dem Vergleich zwischen dem mittleren Tagesabfluß über alle Tage (TW + RW) und dem mittleren Trockenwetterabfluß kann man schließen, daß ca. 85% der gesamten Fördermenge aus dem Einzugsgebiet Bremen-Linkes-Weserufer nach Seehausen aus Schmutzwasser besteht und 15% aus Regenwasser.

### 5.2 Implementierung der Vergleichmäßigungsstrategie

Das erweiterte Steuerungskonzept sieht auch eine *Vergleichmäßigung* der Förderleistung nach Seehausen vor, die auf der Unterscheidung zwischen einem Nacht- und einem Tagesbetrieb beruht. Aus den oben dargestellten Förderganglinien (HPWL → Seehausen) wurden folgende mittlere Förderleistung ermittelt:

- Tagesbetrieb: [7:00 - 19:00 Uhr] mittlere Förderleistung **517l/s** = 155,1 m<sup>3</sup>/ 5 Min,
- Nachtbetrieb: [19:00 - 6:00 Uhr] mittlere Förderleistung **331l/s** = 99,3 m<sup>3</sup>/ 5 Min.

Eine zusätzliche Randbedingung ist, daß die im Kanal auftretenden Ablagerungsvorgänge durch die Vergleichmäßigung nicht begünstigt werden. Diese Gefahr ist im unteren Bereich des Kanalnetzes aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten besonders hoch (vgl. Tab.21, Tab. 22).

Tab.21: Kenndaten der letzten Haltung vom Entwässerungsnetz (aus der Kanalnetzdatei zur Simulation mit einem hydrodynamischen Simulationsmodell).

Haltungs Name	Länge (m)	Gefälle (%)	d (m)	Q <sub>voll</sub> <sup>(1)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	V <sub>voll</sub> <sup>(1)</sup> (m/s)
HZ14	331	0,015	2,95	3,864	0,57

Tab.22: Fließzustand in der (untersten) Haltung HZ14 unter Normalabfluß

Haltung	Q=0,8 <sup>(2)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Q=0,6 <sup>(2)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Q=0,3 <sup>(2)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Q=0,15 <sup>(2)</sup> (m <sup>3</sup> /s)
Q/Q <sub>voll</sub>	0,207	0,155	0,078	0,039
v (m/s)	<b>0,45</b>	<b>0,42</b>	<b>0,35</b>	<b>0,28</b>
y/d (-)	0,307	0,264	0,186	0,132
h (mNN)	-0,99	-1,12	-1,35	-1,51
H10 (m)	<b>1,46</b>	<b>1,33</b>	<b>1,1</b>	<b>0,94</b>

Anmerkungen:

- (1) Berechnung nach der Formel von PRANDTL-COLEBROOK.
- (2) Die Berechnung erfolgt mit Hilfe der im ATV-A110 aufgeführten Teilfüllungskurven.

In Tab.22 werden für den unteren Netzbereich die Fließgeschwindigkeiten und entsprechenden Wasserstandshöhen am Pegel H10 für mehrere TW-Durchflußwerte aufgeführt, unter der Bedingung, daß *Normalabfluß* herrscht. Nach Angaben der ATV-Arbeitsblätter A110 und A128 besteht bei Geschwindigkeit kleiner 0,5 m/s Ablagerungsgefahr.

Bei gleichem Durchfluß kann eine deutlich höhere Geschwindigkeit erreicht werden, wenn der Wasserstand im Rohr unterhalb des Niveau bei Normalabfluß eingehalten wird (erhöhtes Energiegefälle, kleinere Querschnittsfläche). Bei Q=0,8 m<sup>3</sup>/s beträgt die Geschwindigkeit ca. 1,2 m/s, wenn der Wasserstand an H10 auf 1 m über Sohlhöhe sinkt. Bei solcher Geschwindigkeit können die Ablagerungen auf der Kanalsole abgetragen werden.

Es wird deshalb vorgeschlagen, den Wasserstand an H10 ständig im niedrigen Bereich [-1,50 mNN ; -1,0 mNN] bzw. [1m, 1,5m] zu halten.

1. SOLANGE der Wasserstand an H10 im Bereich [-1,5mNN ; -1,0 mNN] bzw. [1,0m ; 1,5m] bleibt, wird folgendes empfohlen:
  - Im Tagesbetrieb: Förderleistung in die KA: 510 l/s = 153 m<sup>3</sup>/ 5 Min.
  - Im Nachtbetrieb: Förderleistung in die KA: 320 l/s = 96 m<sup>3</sup>/ 5 Min.

Die gewählten Pumpenförderleistungen liegen ein wenig unter den berechneten mittleren Durchflußwerten, so daß der Wasserstand im TW-Fall langsam ansteigen soll. Die berechnete Anstiegsdauer beträgt ca. 1,2 Tage.

Anmerkung:

Bei einem Wasserstand an H10 von -1,00 mNN (1,5 m) beträgt die Stauraumauslastung ca. 2362 m<sup>3</sup>, bei einem Wasserstand in H10 von -1,50 mNN (1,0 m) ca. 1288 m<sup>3</sup>. Die Speicherdifferenz beträgt 1074 m<sup>3</sup>.

2. WENN der Wasserstand an H10 den Grenzwert -1,0 mNN (1,5 m) überschreitet, DANN soll er auf das Niveau -1,50 mNN (1 m) durch erhöhte TW-Förderung zurückgebracht werden. Die vorgeschlagene erhöhte Förderleistung beträgt 800 l/s = 240 m<sup>3</sup>/ 5 Min. Dadurch soll im Tagesbetrieb der Wasserstand an H10 innerhalb ca. einer Stunde auf das Niveau 1,0 m über Sohle zurückgebracht werden. Im Nachtbetrieb fällt der Wasserstand an H10 infolge der erhöhten TW-Förderung ungefähr zweimal so schnell ab.
3. WENN der Wasserstand an H10 den Grenzwert -1,5 mNN (1,0 m) unterschreitet, DANN soll die Fördermenge reduziert werden.
  - Sie wird zunächst auf 150 l/s gesetzt, bis der Wasserstand den Wert wieder das Niveau -1,25 mNN (1,25 m) erreicht.
  - WENN der Wasserstand den Wert -1,70 mNN (0,80 cm) unterschreitet, DANN wird die Förderung vollständig eingestellt.

Anmerkung:

Da die empfohlenen Förderleistungen (510 bzw. 320 l/s) jeweils unter die mittleren Zuflußwerte (517 bzw. 331 l/s) liegen, sollte es selten vorkommen, daß der Wasserstand unter -1,50 mNN (1 m) sinkt.

## 6. Ermittlung des Steuerungspotentials für eine güteorientierte Steuerung bei Mischwasserabfluß

### 6.1 Einführung in die Problematik

Die Bremer Entsorgungsbetriebe (BEB) untersuchen seit mehreren Jahren das Verhalten des Entwässerungssystems auf dem linken Weserufer mit dem Ziel, den Kanalbetrieb zu optimieren. Solch übergeordnetes Ziel beinhaltet Teilaufgaben, die sich auf verschiedene physikalische Vorgänge beziehen, deren Beobachtung und Kontrolle angestrebt wird. Beispiel dafür sind:

- Fließvorgänge und Einstauverhalten in den Stauräumen und im Kanalnetz
- Entlastungsvorgänge
- Ablagerungsvorgänge in den Stauräumen
- Klärwirkung durch die Regenüberlaufbecken

Im Rahmen der Erneuerung des Datenerfassungssystems in Bremen-Linke-Weserufer wurde Ende der achtziger und Anfang der neunziger Jahre Computer-Programme für die halb-automatische Stauraumbewirtschaftung entwickelt. Als Grundlage dieser Untersuchung wurden folgende Daten bzw. Informationen herangezogen:

- Erfahrungsschatz der Bremer Entsorgungsbetriebe
- Untersuchung der vom Erfassungssystem gespeicherten Meßdaten
- Ergebnisse von numerischen Simulationsläufen mit Hilfe unterschiedlicher Berechnungsprogramme (hydrologisch vereinfacht oder hydrodynamisch)
- Ergebnisse von unterschiedlichen Entscheidungsmodulen zur Bestimmung der Steuerungsstrategie (Optimierungsprogramme und regelbasierte Systeme)

Die automatisch zu bestimmende *Steuerungsstrategie* wurde in Form von Steuerungsregeln in einer *Regelbasis* zusammengefaßt. Diese Regelbasis wird von einem *Regelinterpret* gelesen, um in Abhängigkeit der Wetterlage, des Netzzustandes und anderer Randbedingungen (z.B. Niederschlagsintensität, Wasserstände, Pumpenförderleistungen) dem Machinisten Steuerungsaktionen zu empfehlen.

Folgende Kriterien (in der Reihenfolge ihrer Priorität) liegen zur Zeit den Steuerungsregeln implizit zugrunde:

1. Die Überflutungsmenge und -häufigkeit.
2. Die Entlastungsmenge und -häufigkeit.
3. Die Energiekosten.

zu 1.)

Das Kriterium "Überflutungshäufigkeit" dient der Beurteilung des Entwässerungskomforts. Es hat sich erwiesen, daß *dieses Kanalsystem nur in geringem Maße durch Überflutungen gefährdet ist*. Dieses läßt sich aus zwei Gründen erklären:

- a) Die spezifische Speicherkapazität im Netz (Stauraum + Röchhaltebecken) ist vergleichsweise sehr hoch ( $>110\text{m}^3/\text{ha}_{\text{red}}$ ).
- b) Die Pumpenförderleistungen unterhalb der beiden Stauräume (Krimpel, HPWL) sind ausreichend. Untersuchungen zur Charakterisierung der Niederschlagsabflüsse haben z. B. gezeigt, daß für einen Blockregen ( $n=15\text{mm}$ ,  $D=30\text{min}$ ,  $T=2,5\text{a}$ ) der maximale Oberflächenabfluß aus dem gesamten Gebiet zwischen 6 und  $7\text{ m}^3/\text{s}$  liegt. Die gesamte Förderleistung der Schnecken und Pumpen im HPWL übersteigt diesen Wert, so daß Mischwasserüberflutungen - falls überhaupt - nur kurzzeitig auftreten können, es sei denn, die Wiederkehrzeit des Ereignisses ist deutlich höher als 2,5 Jahre.

zu 2.)

Durch Limitierung der Mischwasserentlastungen aus den Regenüberlaufbecken sollen die Kanalvorfluter (Weser, Wasserlöse, Krimpelfleet) geschützt werden. Obwohl die gesetzlichen Anforderungen an das Entwässerungssystem auf dem linken Weserufer weitgehend erfüllt sind, streben die BEB weitere Verbesserungen durch Erweiterung des Steuerungskonzeptes auf die Güteproblematik an. Die Ergebnisse des laufenden Vorhabens werden zudem die Entwicklung des neuen Steuerungskonzeptes auf dem rechten Weserufer beeinflussen.

zu 3.)

Eine Reduzierung der Energiekosten wird dadurch erzielt, daß Spitzenförderleistungen der Pumpen (zur Befüllung der Regenüberlaufbecken) vermieden werden. Dies setzt voraus, daß eine relativ genaue Zuflußvorhersage implementiert wird.

Im Zuge einer weitergehenden Optimierung des Kanalbetriebes (bzw. Verbesserung der implementierten Regelbasis) soll das Potential für eine güteorientierte Steuerung des Kanals zum ersten Mal geprüft werden.

Ausgangspunkt der Untersuchung ist die Tatsache, daß die Belastung des Gewässers nicht in erster Linie durch die entlasteten Volumina verursacht wird - die Weser kann die maximalen Entlastungsraten aus den RÜB's ohne großen Schaden verkraften - , sondern durch die entlasteten Frachten.

Die durch Mischwasserüberläufe verursachten organische Verschmutzung bilden im Zuge der Verbesserung des Gütezustandes der Weser (u.a. bedingt durch den Industriewandel in den neuen Bundesländern) eine wachsende Gefahr für das biologische Gleichgewicht des Flusses.

In diesem Teil der Untersuchung sollen den BEB Elemente an die Hand gegeben werden, die zur Beantwortung folgender Frage beitragen sollen:

*Kann eine explizite Berücksichtigung des Gütezustandes im Kanal die Bestimmung der Steuerungsaktionen dermaßen beeinflussen, daß nennenswerte Unterschiede gegenüber der (heute implementierten) mengenmäßigen Kanalbetrachtung entstehen?*

Um die Relevanz und die Aktualität dieser Frage zu unterstreichen, wird zunächst das Entwässerungssystem im Hinblick auf die Steuerung in zwei Grafiken schematisch dargestellt, wobei besonders die Unterschiede zwischen einer mengenmäßigen und einer güteorientierten Steuerung aufgezeigt werden. Zur Verdeutlichung der Problematik werden anschließend einige theoretische Zustandsfälle aufgelistet, bei denen ein güteorientiertes Steuerungskonzept deutlich vom derzeit gültigen Konzept abweicht.

Dann werden die wichtigsten Ergebnisse und Schlußfolgerungen der durchgeführten Meßkampagnen erläutert.

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird das derzeit vorhandene Potential für eine güteorientierte Steuerung abgeschätzt und ein Vorschlag zur künftigen Vorgehensweise in Richtung einer Gütesteuerung erarbeitet.

## 6.2 Beschreibung des Entwässerungssystems Bremen-Linkes-Weserufer im Hinblick auf die Steuerung

Die Weser stellt den Hauptvorfluter dar. Die Kläranlage und das Entlastungsbauwerk im HPWL münden in die Weser.

Eine weitere Entlastungsmöglichkeit besteht im RÜB des HPWL durch ein Wehr, über das in die Wasserlöse einleitet werden kann. Wegen der hohen Empfindlichkeit des Ökosystems in der Wasserlöse wird angestrebt, nur in Ausnahmesituationen Entlastungen dorthin vorzunehmen.

Im Einzugsgebiet Krimpel besteht über das Regenüberlaufbecken eine Entlastungsmöglichkeit in den Krimpelfleet.

In den Bild 35 ist das Kanalsystem unter Betrachtung einer mengenmäßigen Steuerung, in Bild 36 aus Sicht einer güteorientierten Steuerung dargestellt.

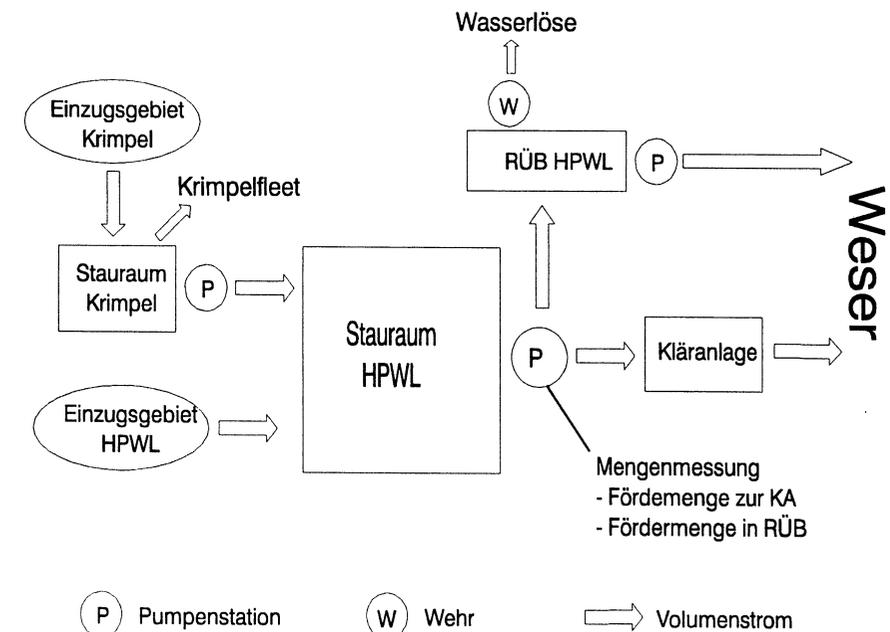


Bild 37: Systemdarstellung Bremen-Linkes-Weserufer für eine mengenmäßige Steuerung

Bei der mengenorientierten Steuerung werden ausschließlich Volumenströme betrachtet. Ist das Stauraumvolumen im Kanalnetz ausgeschöpft, werden die Regenüberlaufbecken befüllt und sind auch diese Speicherkapazität ausgeschöpft, muß in die Weser entlastet werden.

Eine güteorientierte Steuerung im allgemeinen Sinne setzt eine Gesamtemissionsbetrachtung voraus. Ziel dabei ist es, die Summe der entlasteten Frachten aus Mischwasserentlastungen und Kläranlagenabläufen zu minimieren.

Wäre die Konzentration im Mischwasser konstant über die Zeit, so gäbe es keinen Unterschied zwischen einer güteorientierten und einer mengenmäßigen Steuerung. In der Realität aber bleibt die Mischwasserkonzentration nicht konstant, sondern unterliegt bestimmten Schwankungen, die durch komplexe Wechselwirkungen zwischen verschiedenen physikalischen Teilprozessen bedingt sind. Im folgenden werden die wichtigsten Teilprozesse aufgezählt und im Hinblick auf eine Gütesteuerung bewertet:

- Mischungsverhältnis zwischen Regenwasser und Schmutzwasser
- Akkumulation / Abtrag der Schmutzstoffe an der Oberfläche (beeinflusst die Schmutzkonzentration des Regenwassers im Kanal)
- Einleitungen von Indirekteinleitern (Konzentrationsspitzen auch bei Regenwetter)
- Konzentrationsschwankungen des häuslichen Schmutzwassers
- Ablagerung / Resuspension der Schmutzstoffe im Kanal
- Absetzvorgänge in den Überlaufbecken **(Steuerungsabhängig)**
- Reinigungsleistung der Kläranlage **(Steuerungsabhängig)**  
(bei hoher Belastung der Kläranlage über einen langen Zeitraum sinkt die Reinigungsleistung)

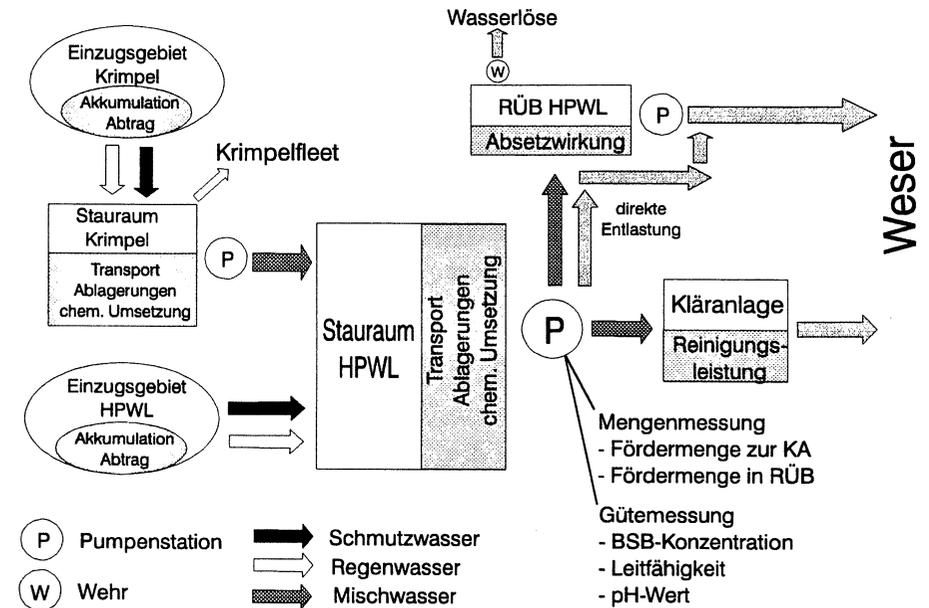


Bild 38: Systemdarstellung Bremen-Linke-Weserufer für eine güteorientierte Steuerung

Durch Überlagerung dieser Teilprozesse und bedingt durch die sonstigen Eigenschaften des Entwässerungssystems und seines Betriebes können folgende charakteristischen Erscheinungen in den Konzentrations- bzw. Frachtganglinien auftreten:

- First-Flush : Schmutzstoß bei Niederschlagsbeginn durch Abspülen der Schmutzstoffe auf der Straßenoberfläche und/oder im Kanal
- Last-Flush : Schmutzstoß am Ende der Kanalentleerungsphase
- Konzentrationsspitzen bedingt durch Einleitungen

Fallbeispiel 1 (Bild 39):

In diesem Fall sinkt die Schmutzkonzentration im Stauraum, bedingt durch die Mischverhältnisse, unter den angestrebten Ablaufwert der Kläranlage. Eine direkte Entlastung des Stauraums in die Weser ist denkbar, da sonst die Beschickung von sehr stark verdünntem Mischwasser über einen längeren Zeitraum zu einer hydraulischen Überlastung der Kläranlage und damit zu einer Beeinträchtigung der Reinigungsleistung führt.

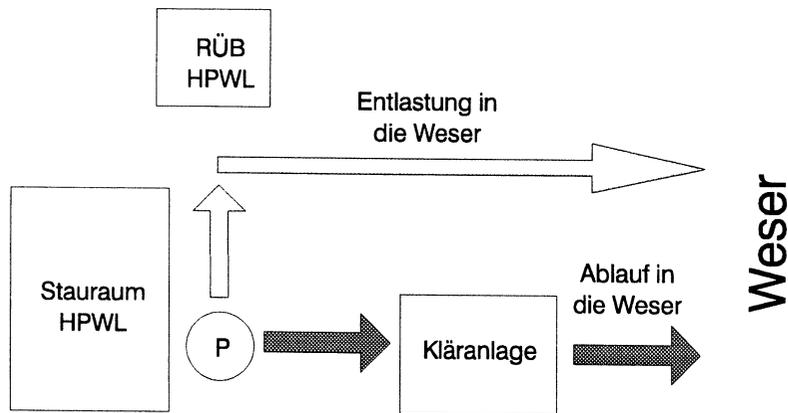


Bild 39: Fallbeispiel 1 - Auftreten von sehr verdünntem Mischwasser-

Fallbeispiel 2 (Bild 40):

Im Laufe des Ereignisses treten zeitweilig deutlich erhöhte Schmutzkonzentrationen auf. Beispiel dafür sind folgende Zustandskonfigurationen:

- Ein ausgeprägter First-Flush bzw. Last-Flush mit deutlich höheren Schmutzkonzentrationen als gewöhnlich wird systematisch (bei allen großen Niederschlagsereignissen) beobachtet.
- Eine Einleitung mit sehr hoher Schmutzkonzentration steht bevor.

Bei hoher Absetzwirkung ist ein Durchlauf durch die Becken immer vorteilhaft. Wenn die Absetzwirkung der RÜB's gering ist, kann eine Mischung des "dicken" Mischwassers in den Becken mit dem "dünnen" Mischwasser, das weiterhin aus dem Kanalnetz zuläuft, die Frachtmengen bei einer Entlastung erhöhen.

In diesem Fall sollte das "dünne" Mischwasser direkt in die Weser eingeleitet werden.

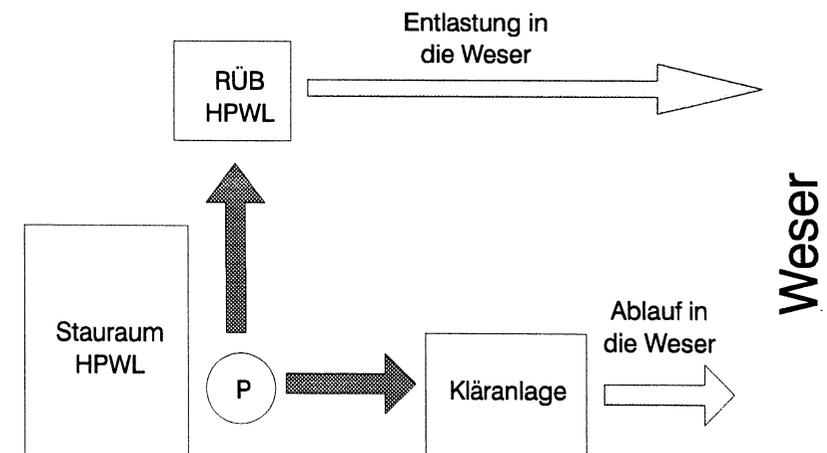


Bild 40: Fallbeispiel 2 - hohe Schwankung der Konzentration -

### 6.3 Ergebnisse der Untersuchung zur Charakterisierung der Gütesituation im Kanal Bremen-Linkes-Weserufer

Aus den oben aufgeführten Fallbeispielen ist ersichtlich, daß das Potential einer Gütesteuerung stark vom Auftreten bestimmter Muster im Konzentrationsverlauf abhängt. Seit mehreren Jahren werden von den BEB Untersuchungen zur Güteproblematik durchgeführt, wobei Schritt für Schritt das erforderliche Datenmaterial gesammelt und analysiert wird.

In einer früheren Untersuchung wurde von der Universität Hannover (A. Durchschlag) die Beschaffenheit des Mischwasserabflusses an der Entlastungsanlage PW Horn (auf dem rechten Weserufer) durch umfangreiche Beprobungskampagnen ermittelt. Die Konzentrationswerte relevanter Güteparameter (CSB, BSB, ASS, Nges, Org. N, NO<sub>3</sub>, Pges, NH<sub>4</sub>, Leitfähigkeit, pH) wurden gemessen und im Rahmen der vorliegenden Untersuchung statistisch ausgewertet (siehe auch Kap. 3).

Die (stark korrelierten) Summenparameter CSB und BSB charakterisieren die organische Verschmutzung des Mischwassers in erster Annäherung:

- Der CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf) gibt die gesamte organische Verschmutzung des Abwassers. Er wird durch Zersetzung aller organischen Verbindungen mit Hilfe eines starken Oxidationsmittels bestimmt.
- Der BSB<sub>5</sub> (Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen) ist ein Maß für die organische Verschmutzung und beschreibt den Sauerstoffbedarf der Mikroorganismen bei der Umsetzung der organischen Stoffe. Der BSB<sub>5</sub> bildet den Teil des CSB, der leicht abbaubar ist. Diese leicht abbaubare Verschmutzung stellt kurzfristig die Hauptgefahr für das Gewässer dar, und kann unter Umständen ein Umkippen des Gewässers verursachen.

Aufgrund der oben beschriebenen Untersuchung und unter Berücksichtigung der Ergebnisse paralleler Untersuchungen wurde entschieden, ein BSB-M3-Meßgerät der Firma STIP im Kanal (Pumpensumpf des HPWL) zu installieren.

Nach anfänglichen Schwierigkeiten bei der Messung (Verstopfung der Leitungen) und der Datenübertragung (Störungen der Übertragungskette) werden seit mehreren Monaten brauchbare Daten aufgenommen, deren Genauigkeit und Repräsentativität auch im Rahmen dieses Projektes (Abschlußbericht Teil I) ermittelt wurden.

Die Analyse der **Trockenwettertage** zeigt folgende Ergebnisse für die drei Güteparameter (KHELIL (1993)):

1. Die pH-Werte treten in einem Bereich zwischen 8-9 auf.
2. Die Leitfähigkeit liegt bei ca. 1,3 mS/cm.
3. Die BSB-M3-Werte schwanken in einem Bereich von 500-800 mg/l.

Bei **Regenwasserzufluß** wurde folgendes festgestellt (KHELIL (1993)):

1. Die pH-Werte bleiben von der Mischung mit Regenwasser weitgehend unbeeinflusst.
2. Die Leitfähigkeitswerte nehmen ab.
3. Die BSB-M3-Werte nehmen ebenfalls ab. Als Minimalwert wurden ca. 50-60 mg/l BSB-M3 gemessen.
4. Nach Auftreten des Regenwasserzuflusses nehmen die Leitfähigkeits- und BSB-M3-Werte einen ähnlichen sinkenden Verlauf. In diesem Fall stellt sich zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 ungefähr ein Verhältnis

$$\frac{\text{Leitfähigkeit [mS / cm]}}{\text{BSB - M3 [mg / l]}} \approx \frac{1}{300} \quad \text{ein.}$$

5. Treten Fremdeinflüsse auf (z.B. Industrieleitungen, Einleitungen aus der Weser), wird dieses Verhältnis erheblich gestört. Eine genaue Charakterisierung der registrierten Störeffekte würde über den Rahmen dieser Untersuchung hinausgehen. Weitere detailliertere Untersuchungen sind notwendig. Die offensichtlich vorhandene Redundanz während Regenwetter zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 könnte man ausnutzen, um anomale Situationen möglichst frühzeitig zu erkennen (vgl. Kap. 3).
6. Die BSB-M3-Meßwerte weisen eine zeitliche Verzögerung gegenüber der tatsächlich vorhandenen BSB<sub>5</sub>-Konzentration auf. Eine Untersuchung ergab, daß die Verzögerungszeiten in einem Spektrum von 3 bis ca. 60 Minuten liegen (vgl. Kap. 2).

Bild 39 zeigt beispielhaft für den 27.1.1994 die oben beschriebenen Phänomene. Zu erkennen ist der Abfall der Leitfähigkeits- und BSB-M3-Werte bei einsetzendem Niederschlag. Zwei Konzentrationsspitzen beim BSB-M3 deuten auf (Industrie-) Einleitungen hin. Während einer Einleitung fand eine Entlastung in die Weser statt. Die BSB-M3-Konzentrationsspitzen werden nicht durch ähnliche Schwankungen der Leitfähigkeit begleitet.

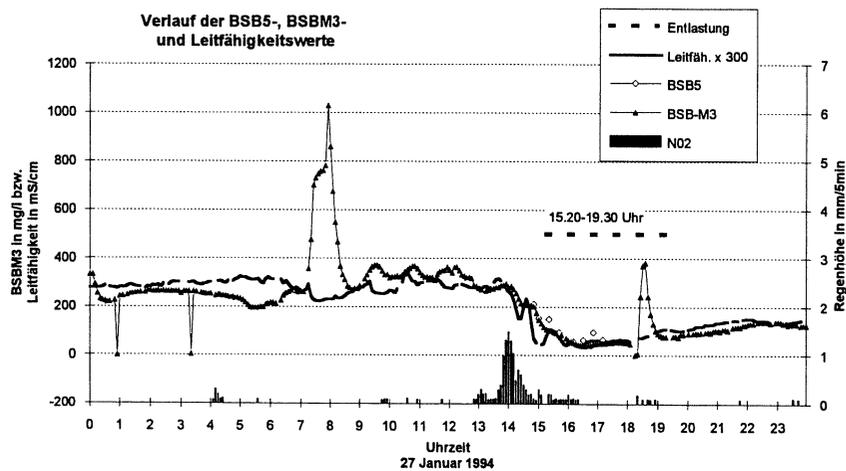


Bild 41: Ganglinienverlauf am 27.1.1994

#### 6.4 Steuerungspotential für eine Gütesteuerung in Bremen-Linkes-Weserufer

Zur Abschätzung des Steuerungspotentials wurden für die 5 beprobten Mischwasserereignisse und für weitere relevante Tage vor und nach den Ereignissen die Meßwerte des Datenerfassungssystems und die Steuerungsaktionen aufgezeigt und analysiert. Tabelle 23 gibt eine Übersicht über die untersuchten Variablen. Die grafischen Darstellungen der Ganglinien sind in Anlage 7 beigefügt.

Tab 23: Analytierte Variablen und Tage zur Abschätzung des Potentials für eine Gütesteuerung

Datum	Niederschläge Wasserstand Weser	Stauraumauslastung Steuerungsstrategie Regenüberlaufbecken	Leitfähigkeit BSB5/BSBM3	Frachten Steuerungsstrategie Wasserstände	PH-Werte
22.09.1993	X	X	X	X	X
23.09.1993	X	X	X		X
24.09.1993	X	X	X		X
03.10.1993	X	X	X	X	X
04.10.1993	X	X	X	X	X
08.10.1993	X	X	X		X
09.10.1993	X	X	X		X
07.12.1993	X	X	X		X
08.12.1993	X	X	X		X
09.12.1993	X	X	X		X
10.12.1993	X	X	X		X
25.01.1994	X	X	X	X	X
26.01.1994	X	X	X	X	X
27.01.1994	X	X	X	X	X

Als Ergebnis der Auswertungen ist folgendes festzustellen:

Mit der derzeit am HPWL vorhandenen meßtechnischen Konfiguration und den damit zur Verfügung stehenden Informationen würde sich ein guteorientiertes Steuerungskonzept von der rein mengenmäßigen Steuerung nicht unterscheiden da folgende Konstellation vorhanden sind:

1. Die BSB-Konzentrationen des Mischwassers im Pumpensumpf liegen bei allen untersuchten Niederschlags-Abfluß-Ereignissen höher (gemessener Minimalwert: 60 mg/l BSB<sub>5</sub>) als der gesetzliche Grenzwert für Kläranlagenabläufe von 20 mg/l BSB. Eine direkte Entlastung in die Weser entsprechend Fallbeispiel 1 ist demnach nicht möglich.

2. Im Kanalnetz tritt kein ausgeprägter First-Flush bzw. Last-Flush auf. Aufgrund der Trägheit des Systems findet eine Vermischung statt und es besteht nicht die Notwendigkeit z. B. eines der zwei Becken als "Fangbecken" zu nutzen, d.h. sehr früh in die Becken zu pumpen. Die bei einigen Ereignissen zu Niederschlagsbeginn zu beobachtenden Konzentrationsspitzen sind vermutlich auf indirekte Einleitungen zurückzuführen. Regelmäßige, charakteristische Konzentrationenmuster, die für alle Niederschlagsereignisse gelten, lassen sich nicht erkennen.

Die jetzige Steuerungspraxis, nach der so weit wie möglich im Stauraum gespeichert, danach die RÜB befüllt werden und dann über den Beckenüberlauf entlastet wird, ist gerechtfertigt. Es wird tatsächlich dann entlastet, wenn das Mischwasser weitgehend verdünnt ist.

**Mit den derzeit am HPWL zur Verfügung stehenden Informationen lassen sich keine Unterschiede zwischen einer güteorientierten und einer mengenmäßigen Steuerung feststellen.**

Dies bedeutet aber nicht, daß kein Potential für eine Gütesteuerung vorhanden ist, da nur der "einfachste Fall" für eine güteorientierte Steuerung untersucht werden konnte (direkte Entlastung in die Weser bei Vorhandensein von Mischwasserkonzentrationen unterhalb der Kläranlagenablaufwerte, entsprechend Fallbeispiel 1). Eine vollständige Ermittlung des güteorientierten Steuerungspotentials setzt eine Gesamtemissionsbetrachtung voraus. Hierfür sind weitere Informationen notwendig, wie:

1. Die klärtechnische Reinigungsleistung der Becken.

Fragestellungen: Wie groß ist die Reinigungswirkung der Becken?  
Läßt sich z. B. durch eine unterschiedliche Beschickungsstrategie die Absetzwirkung der Becken beeinflussen?

2. Die Konzentrationen der Ablaufwerte aus der Kläranlage.

Fragestellungen: Wie hoch sind die Ablaufkonzentrationen der Kläranlage bei hydraulischer Überlastung?  
Welchen Einfluß hat die Abwassermenge und die Überlastungsdauer auf die Ablaufkonzentrationen?

*Das güteorientierte Steuerungspotential ist umso größer, je schlechter die Absetzwirkung der Becken ist und je empfindlicher die Kläranlage auf hydraulische Belastungen reagiert.*

Wenn die Klärwirkung der Becken und die Ablaufwerte der Kläranlage nicht durch Messungen der Konzentrationen in das derzeitige Datenerfassungssystem miteinbezogen werden, hat es auch keinen Sinn für die Steuerung weiterhin Güteparameter zu messen, da kein Unterschied zwischen einer güteorientierten und einer mengenmäßigen Steuerung besteht.

Für die Überwachung und Erfassung von Einleitungen ist die Messung der Parameter Leitfähigkeit, pH-Wert und BSB-M3 jedoch sehr sinnvoll. Mit dem pH-Wert und dem BSB-M3 können Industrie-einleitungen aufgezeigt werden, wobei jeder der beiden Parameter Indikator für die jeweilige Beschaffenheit der Einleitung sein kann. Mit der Leitfähigkeit können z. B. Einleitungen von Weserwasser (und auch Industrie-einleitungen) erkannt werden. Hier wäre es sinnvoll zu prüfen, ob die Einleitungen einer gewissen Systematik unterliegen, damit gezielte Maßnahmen ergriffen werden können.

Mit Hilfe der BSB-M3-Messung können im Hinblick auf den gesetzlich vorgeschriebenen Nachweis der Mischwasserentlastungen der vereinfachenden und wahrscheinlich immer überschätzenden Annahme Mischwassermenge = Mischwasserfracht die tatsächlich in die Weser entlasteten Frachten gegenübergestellt werden. Allerdings müßte hierfür im Idealfall die BSB-M3-Messung direkt an den Einleitungs- und Entlastungsstellen in die Weser vorgenommen werden.

## 7. Verzeichnisse

### 7.1 Literaturverzeichnis

- ALBRECHT, M. (1992) Abwasserverschmutzungsvorfälle, Betriebsanweisung Nr. 60.5 der Bremer Entsorgungsbetriebe, 1992
- ATV-Arbeitsblatt A110 Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen", St. Augustin 1988
- ATV-Arbeitsblatt A115 Hinweise für das Einleiten von Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage, St. Augustin 1990
- ATV-Arbeitsblatt A128 Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenwasserentlastungen in Mischwasserkanälen, St. Augustin 1992
- Freie Hansestadt Bremen (1986) Der Senat: Sanierung des Mischwasserkanalnetzes bis 1990, Amt für Stadtentwässerung und Stadtreinigung, Bremen 1986
- Freie Hansestadt Bremen (1992) Der Senator für Umweltschutz und Stadtentwicklung: Schutz der Weser und der Nordsee, Bremen 1992
- GEISEL, W. (1991) Betriebserfahrungen mit BSB- und CSB-on-line-Messungen Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Heft 22 Meß-, Steuer- und Regeltechnik in der Siedlungswasserwirtschaft, 9. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft, 1.10.1991, S. 227 - 245
- GROTTKER, M. (1987) Regenwasserbehandlung in Trennsystemen, Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft der Universität Hannover, Heft 66, Hannover 1987
- IAWPRC (1989) Task Group on Real Time Control of Drainage Systems, Real Time Control of Urban Drainage Systems, The State of the Art, Pergamon Press, 1989
- KALTE, P. (1990) The Continuous measurement of short-time-BOD Instrumentation, Control and Automation of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems, Proceedings of the 5th IAWPRC Workshop, Yokohama/Kyoto, Japan, 26 July - 3 August 1990, pp. 59 - 68
- KHELIL, A. (1992) Überarbeitung des Steuerungskonzepts in Bremen-Linkes-Weserufer, interner Bericht im Auftrag der Bremer Entsorgungsbetriebe, Hannover 1992
- KHELIL, A. (1993) Untersuchung des vom Datenerfassungssystem aufgenommenen Datenmaterials, interner Zwischenbericht im Rahmen des Projektes "Güteorientierte Abflußsteuerung", Hannover 1993
- KÖHNE, M.; SIEPMANN, F.W.; te HEESSEN, D. (1986) Der BSB<sub>5</sub> und der kontinuierliche Kurzzeit-BSB (BSB-M<sub>3</sub>) im Vergleich, Korrespondenz Abwasser 33, Heft 9, 1986, S. 787 - 793
- MUDRACK, K.; KUNST, S. (1991) Biologie der Abwasserreinigung, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1991
- OTTERPOHL, R. (1993) mündliche Mitteilung Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen
- PILZ, U. (1991) Kontinuierliche, simultane Messung des Biochemischen Sauerstoffverbrauchs und der Belebtschlammrespiration GWA Nr. 127- Stand der Entwicklung analytischer Systeme zur kontinuierlichen Messung und Steuerung für die Bereiche Trinkwasser, Betriebswasser, Abwasser und Gewässer 15. Aachener Werkstattgespräch, 19./20.09.1991, S. 121 - 135
- RISTENPART, E.; UHL, M. (1992) Meßtechnische Erfassung von Ablagerungen, DFG-Forschungsvorhaben Si 242/9", Abschlußbericht, Hannover 1992
- SIEPMANN, F.W. (1992) Die kontinuierliche BSB- und CSB-Messung im industriellen und kommunalen Abwasserreinigungsprozeß, Symposium Nr. 16200/ 12.128 über "Erfahrungen mit Analysen- und Prozeßmeßgeräten in Abwasserreinigungsanlagen", T. A. Esslingen, 1992

- STIP (1993) Regelverhalten des BSB-M3-Gerätes  
Auszüge aus unveröffentlichten Diplomarbeiten
- STIP (1994) Verzögerungsverhalten des BIOX 1000 und BIOX 1010  
Untersuchung auf der HTK Neuss-Süd
- RIEGLER, G. (1984) Kontinuierliche Kurzzeit-BSB-Messung  
Korrespondenz Abwasser 31, Heft 5, 1984, S. 369 - 377

## 7.2 Verzeichnis der Bilder

Nummer		Seite
	TEIL I	
1	Tagesganglinien eines BIOX 1000	11
2	Vergleich von BSB-M3 und BSB <sub>5</sub> am Ablauf einer Nachklärung	12
3	Dynamisches Verhalten des BIOX 1000 bei unterschiedlichen gewerblichen Abwässern	13
4	Dynamisches Verhalten des BIOX 1000 bei gleicher Abwassermatrix	16
5	Vergleich von BIO-MONITOR-Meßsignal und BSB <sub>5</sub> -Konzentrationen	18
6	Vergleich von BIO-MONITOR-Meßsignal und BSB <sub>5</sub> -Konzentrationen	18
7	Reaktionsgeschwindigkeit nach MICHAELIS und MENTEN	20
8	Blockschaltbild des Regelkreises des BSB-M3-Gerätes	22
9	Ergebnisse des dynamischen Tests am 2.8.1993	26
10	Dynamisches Verhalten des BSB-M3-Gerätes im HPWL (Versuch 1)	27
11	Dynamisches Verhalten des BSB-M3-Gerätes im HPWL (Versuch 2)	28
12	Regenwetterbeprobung am 22./23.9.1993	33
13	Regenwetterbeprobung am 3.10.1993	33
14	Regenwetterbeprobung am 8.10.1993	34
15	Regenwetterbeprobung am 8.12.1993	34
16	Regenwetterbeprobung am 27.1.1994	35
17	Verzögerungsverhalten bei der Regenwetterbeprobung am 22./23.9.93	36
18	Verzögerungsverhalten bei der Regenwetterbeprobung am 3.10.1993	36
19	Verzögerungsverhalten bei der Regenwetterbeprobung am 8.10.1993	37
20	Verzögerungsverhalten bei der Regenwetterbeprobung am 8.12.1993	37
21	Verzögerungsverhalten bei der Regenwetterbeprobung am 27.1.1993	38
22	Verlauf der drei Güteparameter an einem Trockenwettertag	43
23	Verlauf der drei Güteparameter an einem Regenwettertag	44
24	Lineare Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 bei Schmutzwasserabfluß	47

Nummer		Seite
25	Lineare Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 bei Schmutzwasserabfluß	48
26	Lineare Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 bei Mischwasserabfluß	51
27	Lineare Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 bei Mischwasserabfluß	52
28	Lineare Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 bei Mischwasserabfluß	53
29	Lineare Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB <sub>5</sub>	55
30	Lineare Regression zwischen Leitfähigkeit und BSB <sub>5</sub>	56
31	Linearen Regression zwischen dem Leitparameter CSB und anderen Schmutzparametern	57
32	Linearen Regression zwischen dem Leitparameter CSB und anderen Schmutzparametern	58
33	Linearen Regression zwischen dem Leitparameter CSB und anderen Schmutzparametern	59
TEIL II		
34	Entwässerungssystem Bremen-Linkes-Weserufer	70
35	Förderganglinie im HPWL für Trockenwettertage	71
36	Förderganglinie im HPWL für Trockenwettertage	72
37	Systemdarstellung Bremen-Linkes-Weserufer für eine mengenmäßige Steuerung	78
38	Systemdarstellung Bremen-Linkes-Weserufer für eine güteorientierte Steuerung	80
39	Fallbeispiel 1 - Auftreten von sehr verdünntem Mischwasser-	81
40	Fallbeispiel 2 - hohe Schwankung der Konzentration -	82
41	Ganglinienverlauf am 27.1.1994	85

## 7.3 Verzeichnis der Tabellen

Nummer		Seite
TEIL I		
1	Dynamisches Verhalten des BIOX 1000 bei wechselnder Abwassermatrix	14
2	Dynamisches Verhalten des BIOX 1000 bei gleicher Abwassermatrix	15
3	T <sub>90</sub> -Werte des BIOX 1000 und BOIX 1010 bei gleicher Abwassermatrix	17
4	LK-Wert-Bestimmungen im Zeitraum der Untersuchung	24
5	T <sub>90</sub> -Werte des BSB-M3-Gerätes im HPWL und Angaben in der Literatur	29
6	Beprobte Niederschlagsereignisse im HPWL	31
7	Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes bei Mischwasser	38
8	Repräsentativität der pH-Wert- und Leitfähigkeitsmessung	40
9	Repräsentativitätsuntersuchung der BSB-M3-Messung bei Schmutzwasserabfluß (27.10.1993)	41
10	Repräsentativitätsuntersuchung der BSB-M3-Messung bei Mischwasserabfluß (4.5.1994)	42
11	Regressionsbeziehung zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 bei Schmutzwasserabfluß	46
12	Regressionsbeziehung zwischen Leitfähigkeit und BSB-M3 bei Mischwasserabfluß	49
13	Regressionsbeziehung zwischen Leitfähigkeit und BSB <sub>5</sub>	54
14	Regressionsbeziehungen zwischen CSB und anderen Schmutzparametern	57
TEIL II		
15	Liste der gemessenen Güteparameter	61
16	Grenzwerte der Güteparameter zur Betriebssicherheit	65
17	Einschränkung des Pumpenbetriebs zur Betriebssicherheit	66
18	Mittelwert der Güteparameter auf der Kläranlage	68
19	Bilanzierung der mittleren Tagesabflüsse	68

Nummer		Seite
20	Tagesfördermenge im HPWL	71
21	Kenndaten der letzten Haltung vom Entwässerungsnetz	73
22	Fließzustand in der Haltung HZ14 unter Normalabfluß	73
23	Analysierte Variablen und Tage zur Abschätzung des Potentials für eine Gütesteuerung	86

#### 7.4 Verzeichnis der Abkürzungen

AbwAG	Abwasserhaushaltgesetz
AOX	Organische Halogenverbindungen
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
d	Rohrdurchmesser (m)
h	Wasserstand in mNN
H10 (m)	Wasserstand in H10 in m über Sohle
HPWL	Hauptpumpwerk Bremen - Linkes Weserufer -
KA	Kläranlage
KSR	Kanalstauraum
Qlinks	Fördermenge aus dem Gebiet Bremen-Linkes-Weserufer nach Seehausen
Qrechts	Fördermenge aus dem Gebiet Bremen-Rechtes-Weserufer nach Seehausen
RW	Regenwetter
RWB	Regenwetterbetrieb
TW	Trockenwetter
TWB	Trockenwetterbetrieb
WHG	Wasserhaushaltgesetz
y	Wasserstand in m über Sohle (m)

#### 7.5 Verzeichnis der Anlagen

##### Anlagen zum Abschlußbericht Teil I

- Anlage 1 Literatur zur Genauigkeit und zum Verzögerungsverhalten des BSB-M3-Gerätes
- Anlage 2 Gerätetechnische Betriebsprotokolle des BSB-M3-Gerätes
- Anlage 3 Protokolle der Versuchserie zur Bestimmung der Genauigkeit und des Verzögerungsverhaltens des BSB-M3-Gerätes
- Anlage 4 Beprobungsprotokolle und Analyseergebnisse der fünf beprobten Mischwasserereignisse
- Anlage 5 Niederschlags-, BSB-M3- und Leitfähigkeitsganglinien für ausgewählte Tage

##### Anlagen zum Abschlußbericht Teil II

- Anlage 6 Altes Steuerungskonzept (Juni - Oktober 1992)
- Anlage 7 Erweitertes Steuerungskonzept (April - Oktober 1993)
- Anlage 8 Ganglinien analysierter Tage zur Abschätzung des Potentials für eine Gütesteuerung