



Aleksandar Simić, BSc

**Fraktionierung des chemischen Sauerstoffbedarfs  
im Zulauf zur Abwasserreinigungsanlage Graz**

**Fractionation of chemical oxygen demand  
in the inflow to the wastewater treatment plant Graz**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Umwelt und Verkehr - Bauingenieurwissenschaften

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer:

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Günter Gruber

Mitbetreuende Assistenten:

Dipl.-Ing. Roman Maier, BSc

Dipl.-Ing. Thomas Franz Hofer, BSc

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, November 2016

Kontakt:  
Aleksandar Simić  
ezdobar@hotmail.com

## **EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG**

### ***AFFIDAVIT***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Menschen bedanken, die mich während meines Studiums begleitet und über die Jahre auf meinem Weg unterstützt haben.

Ich möchte mich auf diesem Wege auch bei Herrn Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gün-ter Gruber bedanken, es mir ermöglicht zu haben, diese Masterarbeit zu verfassen. Herzlichen Dank für Ihre tatkräftige Unterstützung als Gutachter.

Mein Dank geht auch an Herrn Dipl.-Ing. BSc Roman Maier und Dipl.-Ing. BSc Thomas Franz Hofer, die mir mit ihrem Fachwissen und ihren Anregungen oft weitergeholfen haben und damit zum guten Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich möchte mich auch beim Laborteam des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz bedanken, darunter insbe-sondere bei Bernd Stojanovic und Dipl.-HTL-Ing. Harald Gerhold, die mit ihrem Erfah-rungsschatz und kreativen Arbeitsansätzen wesentlich zu dieser Masterarbeit beige-tragen haben.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Allen voran möchte ich mich bei meiner Mutter Elena, meiner Schwester Katarina und meinem Vater Perica bedanken, da sie mir mein Studium in finanzieller, logistischer, aber auch moralischer Hinsicht ermöglicht haben.

Ich bedanke mich bei meinem Neffen Stevan Vanja, der mir während der Monate, in denen diese Arbeit entstanden ist, eine wichtige moralische Stütze war.

Zudem möchte ich mich bei allen Freunden und Bekannten bedanken, die in guten, aber auch in schwierigen Momenten für mich da waren.

## Kurzfassung

Da Wasser durch anthropogene und gewerbliche Aktivitäten verunreinigt werden kann, besteht die moralische und gesetzliche Verantwortung, es möglichst rein wieder in den Wasserkreislauf zurückzuführen. In Österreich bilden die einzelnen Abwasseremissionsverordnungen zum Wasserrechtsgesetz (WRG, 1959), die mit der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EC, 2000) abgestimmt sind, den gesetzlichen Rahmen hierfür in Form von Emissionsgrenzwerten und Mindestreinigungswirkungsgraden. Neben der Entfernung von Stickstoff und Phosphor liegt dabei das Hauptaugenmerk auf der weitestgehenden Entfernung der Kohlenstoffverbindungen.

Seit Jahren gilt der chemische Sauerstoffbedarf CSB weltweit als verlässlicher Indikatorparameter für die Summe der im Abwasser vorhandenen, unter definierten Bedingungen oxidierbaren Stoffe. Als Kohlenstoff-Summenparameter wird der CSB zur Quantifizierung der organischen Belastung von Abwasser verwendet. Seine Einheit bezieht sich auf Milligramm verbrauchten Sauerstoffs zur vollständigen Oxidation je Liter Abwasser ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ ).

Bei der Charakterisierung des CSB wird üblicherweise zwischen dem partikulär gebundenen CSB-Anteil und dem im Abwasser gelöst vorliegenden CSB-Anteil unterschieden. Diese beiden Anteile bzw. Fraktionen sind über eine physikalische Trennung mittels Filtration durch eine Filterporenweite von  $0,45 \mu\text{m}$  definiert. Eine detaillierte Charakterisierung des CSB in biologisch leicht bzw. schwer abbaubare Fraktionen sowie der nicht abbaubaren bzw. inerten Fraktionen ermöglicht eine noch genauere Charakterisierung der Abwassereigenschaften. Die analytische Bestimmung dieser Fraktionen erfolgt anhand der Partikelgröße und der chemischen Auftrennmöglichkeiten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine umfassende Literaturrecherche zum Thema der CSB-Fraktionierung durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse und Erkenntnisse wurden in dieser Arbeit zusammengefasst. Zunächst galt es, den Stand der Wissenschaft zum Thema festzustellen und zusammenzufassen. Anschließend wurden die unterschiedlichen, analytischen Bestimmungsmethoden beschrieben und einander gegenübergestellt.

Da keine einheitlichen Vorgaben zur Bestimmung der CSB-Fractionen bestehen, wurden in weiterer Folge Bestimmungsmethoden ausgewählt, die auch im Labor des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz leicht durchgeführt werden können. Die detaillierte Vorgehensweise zur analytischen Durchführung der ausgewählten Bestimmungsmethoden wurde in einer Arbeitsanweisung (Engl.: SOP – Standard Operating Procedure) festgehalten. Anhand dieser SOP wurde eine 15-tägige Messkampagne auf dem Betriebsgelände der Abwasserreinigungsanlage (ARA) Graz-Gössendorf durchgeführt und die gewonnenen Abwasserproben im Labor des Institutes auf ihre CSB-Fraktionierung hin analysiert.

Die Resultate dieser Messkampagne wurden mit Werten aus der Fachliteratur verglichen. Dabei zeigte sich, dass die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Messdaten mit jenen, die in der einschlägigen Literatur angegeben werden, vergleichbar sind.

## Abstract

Among other things, water can be polluted by living and working activities of the human population. Therefore, it is our moral and legal responsibility to bring the water back to nature as clean as possible. Regarding legal responsibility, the allowed amount of pollutants discharged to a receiving water body, is regulated by the Austrian water law act "WRG 1959" (WRG, 1959). The "WRG 1959" is coordinated with the EU Water Framework Directive (EC, 2000). The legal framework considering wastewater discharges is based on emission limits and values of treatment efficiencies. Apart from the removal of nitrogen and phosphorus, the main focus is set on carbon compounds.

For many years, the chemical oxygen demand COD represents a reliable water quality indicator of the organic matter in wastewater. As the sum parameter of organic carbon, that can be oxidized under defined conditions, the COD has been used to quantify organic pollution of wastewater. Its unit refers to milligram of spent oxygen for the complete oxidation per liter of wastewater (mg O<sub>2</sub>/L).

The COD can be divided in fractions. A useful distinction regarding wastewater characterization can be made between the particulate and soluble fraction of COD. These two fractions can be separated by filtration with 0,45 µm filter size. A more accurate wastewater characterization regarding COD can be made by introducing more detailed sub-fractions, such as readily biodegradable, slowly biodegradable and nonbiodegradable COD. These fractions can be analytical determinate by their physical size and biochemical decomposition properties.

An extensive literature review on the subject of COD fractionation was done to determine the state of science regarding this topic. As a result, the numerous findings in literature considering this topic were summarized. Subsequently, different fractionation methods have been described and compared.

Since there are no common standards for the determination of the COD fractions available, certain methods were selected to be carried out even in the laboratory of the Institute for Urban Water Management and Landscape Water Engineering at Graz University of Technology. The steps to acquire the various COD fractions were summarized in a standard operating procedure (SOP). Finally, a 15-day measurement campaign at the wastewater treatment plant Graz-Gössendorf was conducted based on the developed SOP. The collected wastewater samples were analyzed in the laboratory of the institute and the COD fractions were determined.

Subsequently, the results of this measurement campaign were compared with literature data, which turned out to be comply with the results of the conducted measurement campaign.

## **Gleichheitsgrundsatz**

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Jedoch möchte ich ausdrücklich festhalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. Motivation .....	2
1.2. Ziele der Masterarbeit.....	3
<b>2. Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
2.1. Charakterisierung von organischen Verbindungen im Abwasser .....	4
2.1.1. Chemischer Sauerstoffbedarf CSB .....	4
2.1.2. Biochemischer Sauerstoffbedarf BSB.....	5
2.1.3. Totaler organischer Kohlenstoff TOC.....	7
2.1.4. Gelöster organischer Kohlenstoff DOC .....	8
2.2. Rechtliche Rahmenbedingungen.....	8
2.3. Grundlagen zur Fraktionierung des chemischen Sauerstoffbedarfs .....	11
2.3.1. Biologische Abbaubarkeit von organischen Verbindungen .....	11
2.3.2. Bestandteile der CSB-Fraktionierung.....	13
2.3.3. Fällung zur Bestimmung des gelösten CSB-Anteils.....	20
2.3.4. Filtration zur Bestimmung des gelösten CSB-Anteils.....	21
<b>3. Messmethoden zur Fraktionierung des chemischen Sauerstoffbedarfs CSB</b> .....	<b>22</b>
3.1. Bestimmung des gelösten, schnell abbaubaren CSB ( $S_s$ ).....	23
3.1.1. Methode der Sauerstoffzehrung zur Bestimmung der $S_s$ -Fraktion .....	24
3.1.2. Methode der Sauerstoffzehrungsrate zur Bestimmung der $S_s$ -Fraktion .....	25
3.1.3. Chemisch-physikalische Methoden zur Bestimmung der $S_s$ -Fraktion .....	26
3.2. Bestimmung des partikulären, langsam abbaubaren CSB ( $X_s$ ) .....	28
3.2.1. Näherungsweise Bestimmung der $X_s$ -Fraktion und LACSB.....	29
3.2.2. BSB-Test zur Bestimmung der $X_s$ -Fraktion .....	30
3.3. Bestimmung des gelöst inerten CSB ( $S_i$ ).....	32
3.3.1. Methode zur Bestimmung der $S_i$ -Fraktion .....	33
3.4. Bestimmung des partikulär inerten CSB ( $X_i$ ).....	33
3.4.1. Simulations-Methode zur Bestimmung der $X_i$ -Fraktion .....	34

3.4.2.	STOWA-Methode zur Bestimmung der $X_i$ -Fraktion.....	35
3.4.3.	Alternative Methoden zur groben Abschätzung der $X_i$ -Fraktion .....	35
3.5.	Bestimmung des Anteils an aktiver Biomasse am CSB ( $X_B$ ) .....	37
3.5.1.	Methode zur Bestimmung der $X_B$ -Fraktion.....	37
<b>4.</b>	<b>Auswahl der Fraktionierungsmethoden für den CSB.....</b>	<b>41</b>
4.1.	Auswahl der Methode zur Bestimmung der $S_s$ -Fraktion .....	41
4.2.	Auswahl der Methode zur Bestimmung der $X_s$ -Fraktion .....	42
4.3.	Auswahl der Methode zur Bestimmung der $S_i$ -Fraktion .....	42
4.4.	Auswahl der Methode zur Bestimmung der $X_i$ -Fraktion.....	42
<b>5.</b>	<b>Methodik.....</b>	<b>44</b>
5.1.	Beschreibung der Testversuchsphase .....	44
5.2.	Beschreibung der Messkampagne zur CSB-Fraktionierung.....	45
5.2.1.	Anlagenteile der ARA Graz-Gössendorf .....	48
5.2.2.	Technische Daten der ARA Graz-Gössendorf .....	48
5.3.	Beschreibung des Versuchsablaufs der Hauptversuchsphase.....	49
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>52</b>
6.1.	Ergebnisse der Testversuche mit Fällung .....	60
6.2.	Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Filterauslösung.....	61
6.3.	Ergebnisse des $BSB_5/BSB_\infty$ Verhältnisses .....	63
<b>7.</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>65</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Einordnung organischer Komponenten, welche durch die Summenparameter CSB und BSB <sub>5</sub> erfasst werden können (Thomas & Burgess, 2007) .....	7
Tabelle 2-2: Einteilung kommunale Abwasserreinigungsanlagen nach Größenklassen gemäß 1. AEV .....	10
Tabelle 2-3: Maximale Ablaufkonzentrationen in mg/L in Abhängigkeit von den Größenklassen gemäß Z 1.2 aus der 1. AEV vom 06.05.2016 .....	10
Tabelle 2-4: Optimale pH-Werte des metallischen Fällungsmittels (Wang et al., 2005) .....	21
Tabelle 3-1: Beispiel der Berechnung der partikulär inerten Fraktion des GV (WERF, 2003) .....	36
Tabelle 6-1: Zusammenfassung der Mittelwerte der Literaturdaten über CSB-Fraktionen (Pasztor et al., 2008) .....	52
Tabelle 6-2: Die absoluten Ergebnisse der 15-tägigen Messkampagne und die zugehörige Zulaufmenge zur ARA Graz-Gössendorf .....	54
Tabelle 6-3: Zusammenfassung der Ergebnisse der absoluten CSB-Fraktionen für die 6 TW-Tage der 15-tägigen Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf .....	56
Tabelle 6-4: Zusammenfassung der Ergebnisse der relativen CSB-Fraktionen für die 6 TW-Tage der 15-tägigen Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf .....	56
Tabelle 6-5: Gegenüberstellung der Literaturdaten der CSB-Fraktionierung mit den Ergebnissen der 6 TW-Tage der Messkampagne auf der ARA Graz-Gössendorf .....	56
Tabelle 6-6: Zusammenfassung der absoluten CSB-Fraktionen für die 9 RW-Tage der 15-tägigen Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf .....	59
Tabelle 6-7: Zusammenfassung der relativen CSB-Fraktionen für die 9 RW-Tage der 15-tägigen Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf .....	59
Tabelle 6-8: Gegenüberstellung der absoluten CSB-Fraktionen für die Mittelwerte der 6 TW- und 9 RW-Tage während der 15-tägigen Messkampagne .....	59
Tabelle 6-9: Gegenüberstellung der relativen CSB-Fraktionen für die Mittelwerte der 6 TW- und 9 RW-Tage während der 15-tägigen Messkampagne .....	60

Tabelle 6-10:  $BSB_5/BSB_\infty$ -Verhältnis für die 6 TW-Tage (Ergebnisse der Messkampagne im Zulauf der ARA-Graz-Gössendorf, durchgeführt im Juni und Juli 2016)..... 64

Tabelle 6-11:  $BSB_5/BSB_\infty$ -Verhältnis für die 9 RW-Tage während der Messkampagne im Zulauf der ARA-Graz-Gössendorf..... 64

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Aufteilung des gesamten CSB in verschiedene Fraktionen (Ekama et al., 1986, modifiziert).....	13
Abbildung 2-2:	Grundlegende CSB-Fraktionen von Belebtschlamm-Modellen (ASM) (Pasztor et al., 2008) .....	15
Abbildung 2-3:	Schematische Aufteilung des Gesamt-CSB in verschiedenen Fraktionen (Vestner & Günthert, 2001) .....	17
Abbildung 2-4:	Vereinfachte Aufteilung der CSB-Fraktionen (Sadecka et al., 2013, modifiziert).....	17
Abbildung 2-5:	Mittelwerte des $S_s$ /CSB-Verhältnisses in Abhängigkeit der Versuchsmethode. Dabei ist die Anzahl der behandelten Kläranlagen aus unterschiedlichen Gebieten ersichtlich. (Gillot & Choubert, 2010).....	19
Abbildung 3-1 :	Gesamt-CSB im Zulauf (unfiltriert), CSB-Glasfaser-Filtrat $1,2 \mu\text{m}$ und CSB-Filtrat $0,45 \mu\text{m}$ von kommunalem Abwasser (WERF, 2003).....	23
Abbildung 3-2:	Ablauf eines SBR-Versuchs (Kroiss et al., 2011, modifiziert).....	24
Abbildung 3-3:	Idealisierte Sauerstoffzehrungskurve in einem Sequencing Batch Reactor (SBR) (WERF, 2003).....	25
Abbildung 3-4:	Zusammenhang zwischen Wachstumsrate der Organismen und der Konzentration der gelösten, leicht abbaubaren CSB-Fraktion $S_s$ (WERF, 2003).....	26
Abbildung 3-5:	Das Abfiltrieren von rohem Abwasser durch $0,45 \mu\text{m}$ beziehungsweise $1,2 \mu\text{m}$ Filter mit dem Fällungsschritt (WERF, 2003) .....	30
Abbildung 3-6:	Anpassung der Kurve der $BSB_8$ -Messung und Auswertung des $BSB_\infty$ (Roeleveld & Loosdrecht, 2002) .....	31
Abbildung 3-7:	Abschätzung des Anteils an aktiver Biomasse am CSB ( $X_B$ ) mithilfe der Methode der Sauerstoffzehrung (WERF, 2003, modifiziert).....	38
Abbildung 3-8:	Plot eines Zeit-Sauerstoffzehrungs-Verhältnisses für die Anfangszeit des zunehmenden Sauerstoffverbrauchs (WERF, 2003) .....	40
Abbildung 5-1:	Ablaufschritte der Masterarbeit .....	44
Abbildung 5-2:	Phasen der Flockungsbildung in einer Abwasserprobe ( <a href="http://zistnegar.com/purpose-of-wastewater-analysis">http://zistnegar.com/purpose-of-wastewater-analysis</a> , letzter Zugriff: 2016-09-06).....	45
Abbildung 5-3:	Luftbild der ARA Graz ( <a href="http://maps.google.at">maps.google.at</a> , letzter Zugriff: 2016-07-31).....	46

---

Abbildung 5-4:	Übersicht über die einzelnen Anlagenteile der Abwasserreinigungsanlage Graz-Gössendorf (Hofer et al., 2015).....	47
Abbildung 6-1:	Grafische Darstellung der zugehörigen Zulaufmengen zur ARA Graz-Gössendorf mit farblich hinterlegten Trockenwettertagen .....	55
Abbildung 6-2:	Gegenüberstellung der Mittelwerte der CSB-Fraktionen an den 6 TW-Tagen im Zulauf der ARA Graz-Gössendorf mit internationalen Literaturwerten (Pasztor et al., 2008).....	58
Abbildung 6-3:	Gegenüberstellung der Mittelwerte der CSB-Fraktionen aus Deutschland und der Schweiz (Pasztor et al., 2008).....	58
Abbildung 6-4:	CSB-Restkonzentrationen nach der Fällung bzw. Filtration der Zulaufproben der ARA Graz-Gössendorf in den Filtraten .....	61
Abbildung 6-5:	Filtervorreinigungsversuche mit den Zulaufproben, um Filterbluten in den 24 h-Mischprobe festzustellen .....	62
Abbildung 6-6:	Filtervorreinigungsversuche mit den Ablaufproben, um Filterbluten in den 24 h-Mischproben festzustellen .....	62
Abbildung 6-7:	Gegenüberstellung der modifizierten Ergebnisse für die einzelnen CSB-Fraktionen mit den internationalen Werten, wobei die CSB-Konzentrationen der filtrierte Proben generell um 15 % verringert wurden. ....	63
Abbildung 7-1:	Vergleich der Approximationskurven des BSB <sub>5</sub> und BSB <sub>8</sub> Messdaten laut Roeleveld & Loosdrecht (2002).....	66

## Abkürzungsverzeichnis

AAEV	Allgemeine Abwasseremissionsverordnung
AEV	Abwasseremissionsverordnung
AFS	Abfiltrierbare Stoffe (engl.: Total Suspended Solids TSS)
ARA	Abwasserreinigungsanlage
ASM	Activated Sludge Model (Belebtschlammmodell)
ATV-DWVK	Regelwerk der deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Deutschland)
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf (Engl.: Biochemical Oxygen Demand BOD)
BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach fünf Tagen (Engl.: BOD <sub>5</sub> )
BSB <sup>∞</sup>	Gesamter biochemischer Sauerstoffbedarf (Engl.: BOD <sup>∞</sup> )
BSB <sub>tot</sub>	Gesamter biochemischer Sauerstoffbedarf (mittels Regression approximierter Wert aus der BSB-Messung)
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf (Engl.: Chemical Oxygen Demand COD)
C <sub>CSB</sub>	Konzentration des CSB in der homogenisierten Probe nach DWA-A 131
C <sub>CSB, abb</sub>	Konzentration des gelösten, abbaubaren CSB nach DWA-A 131
DWA-A 131	Arbeitsblatt A 131 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
ffCSB	Flockungsfiltrierter chemischer Sauerstoffbedarf
GV	Glühverlust (Engl.: Volatile Suspended Solids VSS)
IAWPRC	International Association on Water Pollution Research and Control
LACSB	Langsam abbaubarer CSB inklusive kolloidalem Anteil
N <sub>GES</sub>	Gesamtstickstoff
OUR	Sauerstoffzehrungsrate (Engl.: Oxygen Uptake Rate)
Q <sub>ARA</sub>	Bemessungszufluss zur Abwasserreinigungsanlage
RW	Regenwetter
SKOLL	Kolloidale Stoffe
SBR	Sequencing Batch Reactor

$S_{CSB}$	Konzentration des gelösten CSB in der mit 0,45 $\mu\text{m}$ filtrierten Probe nach DWA-A 131
$S_{CSB,abb1}$	Schnell abbaubare Fraktion des CSB
$S_{CSB,abb2}$	Langsam abbaubarer CSB (Partikelgröße < 0,1 $\mu\text{m}$ ) nach Vestner und Günthert (2001)
$S_i$	Gelöst inerte Fraktion des CSB
$S_{CSB,inert}$	Gelöst inerte Fraktion des CSB nach DWA-A 131
SOP	Arbeitsanweisung (Engl.: Standard Operating Procedure)
$S_s$	Schnell abbaubare Fraktion des CSB
STOWA	Dutch Foundation for Applied Water Research
TS	Trockensubstanz
TSB	Gesamter Sauerstoffbedarf
TW	Trockenwetter
WRG	Wasserrechtsgesetz (1959)
WRRL	EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG)
$X_B$	Fraktion der aktive Biomasse
$X_{CSB}$	Konzentration des partikulären CSB (Filterrückstand) nach A 131
$X_{CSB,abb}$	Konzentration des abbaubaren, partikulären CSB nach A 131
$X_{CSB,BM}$	CSB der Biomasse nach A 131
$X_{CSB,inert}$	Konzentration des inerten, partikulären CSB nach A 131
$X_H$	Fraktion der Biomasse (heterotropisch)
$X_i$	Partikulär inerte Fraktion des CSB
$X_s$	Langsam abbaubare Fraktion des CSB

## 1. Einleitung

Da Abwasser laut WRG (1959) gereinigt und der Natur in für Menschen und Tiere unschädlichen Form wieder zugeführt werden soll, ist die Abwassercharakterisierung als Vorstufe zur Abwasserreinigung für die gesamte Wasserwirtschaft von großer Bedeutung. Darüber hinaus spielt die Abwassercharakterisierung eine wesentliche Rolle bei der Dimensionierung einer Abwasserreinigungsanlage (ARA). Im Zulauf zu einer ARA sind unterschiedliche organische und anorganische Stoffe enthalten. Bei der Abwasserreinigung liegt neben der Entfernung von Stickstoff und Phosphor das Hauptaugenmerk auf den organischen Verbindungen. In Österreich bilden Abwasseremissionsverordnungen den gesetzlichen Rahmen für maximal zulässige Abwasseremissionen in Oberflächengewässer in Form von Emissionsgrenzwerten und Mindestreinigungswirkungsgraden.

Im Bereich der Abwassercharakterisierung gilt seit Jahren der chemische Sauerstoffbedarf CSB weltweit als verlässlicher Indikatorparameter für die Summe der im Abwasser vorhandenen, unter definierten Bedingungen oxidierbaren Stoffe (Kainz et al., 2005). Als Kohlenstoff-Summenparameter wird der CSB zur Quantifizierung der organischen Belastung von Abwasser verwendet. Seine Einheit bezieht sich auf Milligramm verbrauchten Sauerstoffs zur vollständigen Oxidation je Liter Abwasser ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ ).

Bei der Charakterisierung des CSB wird üblicherweise zwischen dem partikulär gebundenen CSB-Anteil und dem im Abwasser gelöst vorliegenden CSB-Anteil unterschieden. Diese beiden Anteile bzw. Fraktionen sind über eine physikalische Trennung mittels Filtration durch eine Filterporenweite von  $0,45 \mu\text{m}$  definiert. Eine detaillierte Charakterisierung des CSB in eine biologisch leicht bzw. schwer abbaubare Fraktion sowie einer nicht abbaubaren bzw. inerten Fraktion ermöglicht eine genauere Charakterisierung der Abwassereigenschaften. Die analytische Bestimmung dieser Fraktionen erfolgt anhand der Partikelgröße und der chemischen Auftrennmöglichkeiten.

Der Abwasserreinigungsprozess kann durch mathematische Simulationsmodelle, basierend auf chemischen und physikalischen Zusammenhängen abgebildet werden (Gujer & Henze, 1991). Neben anderen Parametern stellt der CSB dabei einen unverzichtbaren Eingangsparameter dar. Eine detailliertere Erfassung dieses Parameters bzw. die Auftrennung dieses Parameters in seine Subkomponenten bzw. Fraktionen ist dabei eine wichtige Voraussetzung. Die Erfassung der einzelnen CSB-Fraktionen mittels bestehender Methoden ist im Labor relativ einfach umzusetzen, jedoch gibt es keine einheitlichen Vorgaben dazu. Der Zeitaufwand und die Kosten sind dabei sehr oft die wichtigsten Kriterien bei der Auswahl einer Bestimmungsmethode. Die Auswahl und Beschreibung von kostengünstigen und vergleichsweise einfachen Bestimmungsmethoden der CSB-Fraktionen bildet den Schwerpunkt dieser Masterarbeit.

## 1.1. Motivation

Beim Bau oder bei der Optimierung von ARAs besteht oftmals ein Mangel an Informationen über die jeweilige Abwassercharakteristik. Bei der Anwendung von Simulationsmodellen werden die Größenordnungen von notwendigen Parametern meist aus der Fachliteratur entnommen oder durch Erfahrungs- oder Vergleichswerte von anderen ARAs abgeschätzt. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist die Tatsache, dass das Abwasser von Gebiet zu Gebiet durchaus unterschiedliche Charakteristika aufweisen kann. Dies kann vor allem bei der Kalibrierung von Modellen zu systematischen Abweichungen bzw. zur fehlerhaften Abbildung von Teilprozessen im System führen (WERF, 2003).

Am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz wurde im Rahmen des Projekts iZSK – „Gemeinsame Betrachtung der Emissionen aus dem System Zentraler Speicherkanal und Kläranlage Graz durch integrierte Modellierung“ (Hofer et al., 2015) ein dynamisches Simulationsmodell der ARA Graz-Gössendorf entwickelt, bei dem zum überwiegenden Teil Literaturwerte zur Definition der Eingangsgrößen verwendet wurden. Vor allem die einzelnen Fraktionen des CSB sind für die weitere Kalibrierung des Modells von großer Bedeutung. Die Erfassung eben dieser einzelnen CSB-Fraktionen steht im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit. Ein weiteres Ziel bestand darin, zu untersuchen, wie das Grazer Abwasser in Bezug auf seine CSB-Zusammensetzung charakterisiert ist und mit welchen Städten und Ländern es in der Literatur verglichen werden kann. Das Nichtvorhandensein einer Norm zur Bestimmung der einzelnen CSB-Fraktionen stellt darüber hinaus eine weitere Herausforderung dar. Die Ausarbeitung einer Arbeitsanweisung (Engl.: SOP – Standard Operating Procedure), angepasst an die vorhandene Laborausstattung und Möglichkeiten des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz soll dazu dienen, um in Zukunft eine einheitliche Vorgehensweise bei der analytischen Bestimmung der CSB-Fraktionen sicherzustellen.

## 1.2. Ziele der Masterarbeit

Bei der Erstellung dieser Masterarbeit wurden folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Literaturrecherche zur Identifikation von potenziellen Bestimmungsmethoden der CSB-Fraktionen und Recherche von Wertangaben.
- Labortestversuche zur Festlegung der für das Institut geeigneter analytischer Bestimmungsmethoden je CSB-Fraktion.
- Erarbeitung einer Methodik zur Bestimmung der CSB-Fraktionierung im Labor und parallele Erstellung einer Arbeitsanweisung (SOP).
- Durchführung einer Messkampagne auf der ARA Graz zur Gewinnung von Abwasserproben zur analytischen Bestimmung der CSB-Fraktionen.
- Auswertung der Ergebnisse der durchgeführten Messkampagne und Vergleich mit Werten aus der einschlägigen Fachliteratur.
- Adaptierung der Arbeitsanweisung (SOP) auf Basis der Erkenntnisse nach Durchführung der Messkampagne.

## 2. Grundlagen

Wegen der stark sauerstoffzehrenden Wirkung abbaubarer organischer Verbindungen stellt deren Reduktion vor der Einleitung in natürliche Gewässer historisch gesehen die anfängliche Hauptmotivation für die Entwicklung der biologischen Abwasserreinigung dar (ATV-DVWK, 1997). In diesem Kapitel sollen diejenigen Parameter beschrieben werden, welche die Summe an organischen Verbindungen im Abwasser umfassen und deren Bestimmungsmethoden erläutert werden.

Die Zuordnung einer Substanz zur Klasse der organischen Verbindungen ist im Wesentlichen historisch bedingt. Darunter werden alle Verbindungen verstanden, die Kohlenstoff enthalten, mit wenigen Ausnahmen wie Graphit, Diamant, Kohlendioxid sowie Kohlensäure und deren Salze. (Metcalf & Eddy et al., 2008)

### 2.1. Charakterisierung von organischen Verbindungen im Abwasser

In diesem Abschnitt werden die in der Abwasserreinigung wichtigsten Summenparameter in Bezug auf die Charakterisierung von organischen Verbindungen im Abwasser erläutert.

#### 2.1.1. Chemischer Sauerstoffbedarf CSB

Der chemische Sauerstoffbedarf CSB (Engl.: Chemical Oxygen Demand COD) ist ein Summenparameter, der die chemisch oxidierbaren Kohlenstoffverbindungen im Abwasser erfasst. Er wird durch die Menge an Sauerstoff ausgedrückt, die zur vollständigen Oxidation von organischen Verbindungen zu Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasser erforderlich ist. Der Verbrauch an Sauerstoff wird indirekt über den Verbrauch des Oxidationsmittels Kaliumdichromat ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) bestimmt, der in  $\text{O}_2$ -Einheiten umgerechnet wird. Der CSB charakterisiert folglich eine definierte Wirkung aller mit  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  reagierenden Substanzen, unabhängig von deren Zusammensetzung und biologischer Abbaubarkeit (Gujer, 2007). Die standardisierte Methode der CSB-Bestimmung ist für Österreich in der ÖNORM M 6265 (1991) beschrieben.

Diese organischen Verbindungen können entweder in gelöster oder in partikulärer Form vorliegen. Der CSB gibt alle chemisch oxidierbaren Stoffe an. Dieser Wert erfasst auch Stoffe, welche rein biologisch nicht abgebaut werden können. (Vollertsen & Hvitved-Jacobsen, 2002)

Der CSB wird als Leitparameter für die Belastung von Gewässern kommunaler und industrieller Herkunft angewendet. Seine streuungsarme Bestimmung etabliert den CSB als einen der wichtigsten Indikatorparameter, mit dem die Leistungsfähigkeit von ARA, die Beurteilung von Mischwasserentlastungen und die Wirksamkeit einer Niederschlagswasserbehandlung beurteilt werden kann. (Weber, 2013)

Der CSB ist auch ein relevanter Parameter in der dynamischen Simulation von ARA mittels Computermodellierung. Nur über ihn ist eine vollständige Bilanzierung des Kohlenstoffabbaus über die Zeit möglich. Dies stellt auch die Grundlage zur Modellierung der Abwasserreinigung dar. Dafür muss der CSB als Summenparameter in seine Teilkomponenten bzw. Fraktionen aufgeteilt werden. (Vestner & Günthert, 2001)

In kommunalem Rohabwasser liegt die CSB-Konzentration normalerweise zwischen 400 bis 800 mg/L. Die einwohnerspezifische CSB-Fracht beträgt 100 bis 120 g/E\*d. (Kainz et al., 2005)

Mit dem CSB kann ein Großteil der organischen Komponenten im Abwasser erfasst werden. Zu ihnen gehören:

- Biologisch leicht abbaubare Stoffe
- Biologisch schwer abbaubare, natürliche Stoffe (Huminstoffe, Zellulosefasern)
- Biologisch schwer oder nicht abbaubare, künstlich hergestellte organische Stoffe (Pestizide, Lösungsmittel)

Der CSB setzt sich aus einem partikulären Anteil  $CSB_{\text{partikulär}}$  und einem gelösten Anteil  $CSB_{\text{gelöst}}$  (auch als membran-filtrierter CSB –  $CSB_f$  – bezeichnet) zusammen. Die Trennung der beiden Anteile erfolgt dabei physikalisch durch Filtration mit einer Porenweite von 0,45  $\mu\text{m}$ .  $CSB_{\text{gelöst}}$  wird dabei aus dem Filtrat bestimmt.  $CSB_{\text{partikulär}}$  wird aus dem Filtrückstand bestimmt.

Aus ökotoxikologischer Sicht problematisch bei der analytischen Bestimmung des CSB ist das verwendete Oxidationsmittel Kaliumdichromat. Dieser Stoff wird heute als sehr giftig, brandfördernd, umweltgefährlich, erbgutverändernd, fortpflanzungsgefährdend und krebserzeugend eingestuft. Grundlage dafür ist auf europäischer Ebene die letztgültige Chemikalien-Verordnung 1907/2006 (EC, 2006) sowie in Österreich die Novellierung des Bundes-Chemikalien-Gesetzes (BGBl.I.7/2012, 2012). Der Stoff befindet sich derzeit auf einer Kandidatenliste für Problemstoffe laut Bundes-Chemikalien-Gesetzes, laut dem bis 2020 über die Zulassungsbeschränkung bzw. über potenzielle Ersatzstoffe entschieden werden soll.

### 2.1.2. Biochemischer Sauerstoffbedarf BSB

Im Unterschied zum CSB erfasst der biochemische Sauerstoffbedarf BSB (Engl.: Biochemical Oxygen Demand BOD) nur jene Menge an Sauerstoff, die durch mikrobielle Stoffwechselvorgänge beim Abbau organischer Substanzen verbraucht wird. Der BSB gibt daher nur Auskunft über biologisch abbaubare Komponenten des chemischen Sauerstoffbedarfs, welche allein durch Oxidation und ohne Zugabe von Zusatzmitteln abgebaut werden können bzw. deren Abbau nur rein biologisch erfolgt.

Als Maß für die biochemisch durch Bakterien oxidierbaren, organischen Substanzen einer Abwasserprobe wird per Definition die Sauerstoffzehrung innerhalb eines Refe-

renzzeitraums von 5 Tagen ( $BSB_5$ ) bestimmt. Der  $BSB_5$  dient als maßgebliche Kenngröße für die Einordnung kommunaler Kläranlagen in eine Größenklasse nach den gültigen Abwasseremissionsverordnungen und wird im Allgemeinen auch als wesentlichste Bemessungsgröße für die Bemessung biologischer ARAs und die Überwachung der Reinigungsleistung von ARAs verwendet (ATV-DVWK, 2000).

Für kommunale Abwässer stellt die  $BSB_5$ -Bestimmung zusammen mit der CSB-Bestimmung eine einfache und zuverlässige Methode dar, um einen Hinweis auf den Abbaugrad der organischen Abwasserinhaltsstoffe zu erhalten und eine Aussage zur biologischen Behandelbarkeit des untersuchten Abwassers zu machen. In Österreich erfolgt die Bestimmung des  $BSB_5$  nach ÖNORM EN 1899-1 (1998). Zu beachten ist dabei, dass die  $BSB_5$ -Bestimmung nichts über die Geschwindigkeit und den Ablauf der Reaktionen aussagt. Hemmende oder verzögernde Wirkungen bestimmter Abwasserinhaltsstoffe oder auch Prozesse, wie die Adaption der Biozönose an das zu untersuchende Substrat, werden nicht berücksichtigt. Dies kann insbesondere bei einer unbekanntem Abwassermatrix zu unzureichenden Ergebnissen bzw. Fehlinterpretationen führen. Die Bestimmung des  $BSB_5$  benötigt definitionsgemäß einen Messzeitraum von 5 Tagen, wodurch die Messergebnisse gegenüber der CSB-Bestimmung entsprechend zeitversetzt zur Verfügung stehen. Darüber hinaus ist die  $BSB_5$ -Bestimmung ein sog. Bioassay, also eine Analyse, die auf biologischen Prozessen beruht und damit einer großen Streuung unterworfen ist. In der Praxis wird daher häufig eine Korrelation zum CSB aufgestellt. (Gujer, 2007)

Da nicht alle organischen Abwasserinhaltsstoffe biologisch abgebaut werden können, ist die  $BSB_5$ -Konzentration immer kleiner als die CSB-Konzentration und umfasst immer nur einen mehr oder minder großen Anteil des CSB. Zur Ableitung der Abbaubarkeit der organischen Verbindungen in einer Abwasserprobe kann daher das Verhältnis von CSB zu  $BSB_5$  erste Hinweise liefern. Das Verhältnis des CSB zum  $BSB_5$  in kommunalem Abwasser beträgt laut WERF (2003) etwa 2,0 bis 2,2. Industrieabwasser bzw. Giftstoffe, welche die biologische Abbaubarkeit der organischen Stoffe hemmen, erhöhen das Verhältnis von CSB zu  $BSB_5$  deutlich. (Kainz et al., 2005)

Da die  $BSB_5$ -Bestimmung methodisch nur den Anteil der Abwasserinhaltsstoffe erfasst, der biochemisch oxidiert wird, nicht jedoch den Anteil, der in neue Biomasse umgewandelt wird, wird bei einem CSB/ $BSB_5$ -Verhältnis von 2,0 oder kleiner die organische Substanz des Abwassers als biologisch gut abbaubar eingestuft. Abwässer, in denen ein CSB/ $BSB_5$ -Verhältnis von 5 oder größer vorliegt, werden dagegen als schwer biologisch abbaubar eingeordnet (Gujer, 2007).

Tabelle 2-1 zeigt jene Komponenten an, welche mittels CSB- und  $BSB_5$ -Bestimmungen erfasst werden können:

**Tabelle 2-1:** Einordnung organischer Komponenten, welche durch die Summenparameter CSB und BSB<sub>5</sub> erfasst werden können (Thomas & Burgess, 2007)

Nr.	Komponenten	CSB	BSB <sub>5</sub>
		[-]	[-]
1	Gesättigte Komponenten	P	P
2	Fetthaltige ungesättigte Kohlenwasserstoffe	Y	Y
3	Aromatische Komponenten	P	N
4	Säuren	Y	P
5	Aldehyde	P	P
6	Alkohole	Y	P
7	Phenolhaltige Komponenten	Y	P
8	Fetthaltige Amine	P	P
9	Aromatische Amine	P	P
10	Huminstoffartige Substanzen	P	P

**Y: 90-100 % der umgewandelten Komponenten oder hohe Absorptionsfähigkeit**  
**P: Teilweise umgewandelte Komponenten**  
**N: Keine Absorptionsfähigkeit**

### 2.1.3. Totaler organischer Kohlenstoff TOC

Mit der Bestimmung des totalen organischen Kohlenstoffs TOC (Engl.: Total Organic Carbon) erfolgt die Erfassung des organisch gebundenen Kohlenstoffs aller gelösten und ungelösten organischen Verbindungen in einer Abwasserprobe. In Österreich erfolgt die Bestimmung des BSB<sub>5</sub> nach ÖNORM EN 1484 (1997). Die Grundlage des Verfahrens zur Bestimmung des TOC beruht auf der Oxidation der im Abwasser enthaltenen, organischen Kohlenstoffverbindungen und der anschließenden Quantifizierung des dabei entstandenen Kohlendioxids (CO<sub>2</sub>). Die Oxidation kann sowohl thermisch durch Verbrennung als auch nasschemisch durch geeignete Oxidationsmittel durchgeführt werden. (Metcalf & Eddy et al., 2008)

Der so erfasste organisch gebundene Kohlenstoff ist der charakteristische Anteil aller organischen Verbindungen im Abwasser. Der TOC stellt damit wie der CSB ein Maß für die Summe der organischen Verbindungen dar. Aus diesem Grund wird er in der Abwassertechnik vermehrt als Ersatzparameter für den CSB diskutiert. Es kann aber kein allgemein gültiges Verhältnis von TOC zu CSB angegeben werden, da die Einheiten unterschiedlich sind (CSB: mg O<sub>2</sub>/L, TOC: mg CO<sub>2</sub>/L). Die Vorteile der TOC-Bestimmung liegen insbesondere in der höheren Genauigkeit, dem geringeren erforderlichen Probenvolumen, der besseren Automatisierbarkeit des Verfahrens und der Abwesenheit von Kaliumdichromat als Oxidationsmittel. Der Nachteil ist der wesentlich höhere und vor allem teurere apparative Aufwand. (Gujer, 2008)

Wie auch der CSB liefert der TOC keine Information über die biologische Abbaubarkeit der organischen Substanzen. Anhand der Relation der Summenparameter CSB, BSB<sub>5</sub> und TOC lassen sich aber Informationen über die Art der organischen Inhaltsstoffe im Abwasser ableiten.

#### 2.1.4. Gelöster organischer Kohlenstoff DOC

Der gelöste organische Kohlenstoff DOC (Engl.: Dissolved Organic Carbon) bildet zusammen mit dem partikulär organischen Kohlenstoff POC (Engl.: Particulate Organic Carbon) und dem flüchtigen organischen Kohlenstoff VOC (Engl.: Volatile Organic Carbon) den totalen organischen Gesamtkohlenstoff TOC. In Österreich erfolgt die Bestimmung des DOC nach ÖNORM EN 1484 (1997). Als organischer Summenparameter weist er auf die im Wasser gelöste organische Substanz hin. Das Verhältnis CSB/DOC wird als spezifischer Sauerstoffbedarf bezeichnet. In der Laboranalytik wird als äquivalenter Parameter zu DOC oftmals BSB<sub>5</sub> herangezogen.

#### 2.2. Rechtliche Rahmenbedingungen

*„Die Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie – WRRL) ist am 22. Dezember 2002 in Kraft getreten. Sie stellt Qualitätsziele auf und gibt Methoden an, wie diese zu erreichen und gute Wasserqualitäten zu erhalten sind. Im Mittelpunkt steht eine flussgebietsbezogene Betrachtung, die auf Basis einer Ist-Bestands-Analyse die Erstellung planerischer Vorgaben zur Erreichung von Umweltzielen innerhalb vorgegebener Fristen erfordert. Die WRRL wurde in Österreich mit der WRG-Novelle 2003, BGBl. I Nr. 112/2003, die am 22.12.2003 in Kraft getreten ist, in nationales Recht umgesetzt.*

*Im Jahr 2006 wurden mit der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV, BGBl. II Nr. 479/2006, Novellierung mit BGBl. II Nr. 465/2010) die Vorgaben der WRRL zum Monitoring in Österreich umgesetzt und die bestehenden österreichischen Überwachungsprogramme entsprechend angepasst. Es gibt drei Arten von Überwachungsprogrammen:*

- *Überblicksweise Überwachung*
- *Operative Überwachung*
- *Überwachung zu Ermittlungszwecken“*

([https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu\\_wasserrecht/Wasserrahmen-RL.html](https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu_wasserrecht/Wasserrahmen-RL.html), letzter Zugriff: 2016-10-22)

Generelle Anforderungen der Aufsicht der Gewässer und Wasseranlagen sind im österreichischen Wasserrechtsgesetz (WRG, 1959) geregelt. Dieses Gesetz sorgt auch für die Einhaltung der Rechtsvorschriften, welche bei den bewilligten Anlagen getroffen wurden. (Abteilung 15 der Steiermärkischen Landesregierung, 2015).

Das Wasserrechtsgesetz (WRG, 1959) sorgt für die qualitative und quantitative Erhaltung der Oberflächen- und Grundgewässer. Das Gesetz reguliert nicht nur die Trink- und Nutzwasserverwendung, sondern erstreckt sich auch auf die Energie, die aus der

motorischen Kraft des Wassers erzeugt werden kann. Das Hauptziel ist, die Wasserressourcen sparsam zu verwenden und im Falle der Nutzung der Natur wieder möglichst rein zurückzuführen.

„Die nach dem Wasserrechtsgesetz (WRG) zuständigen Wasserrechtsbehörden sind:

- Die Bezirksverwaltungsbehörden ( § 98 WRG),
- der Landeshauptmann ( § 99 WRG),
- der Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft ( § 100 WRG)
- sowie in bestimmten Fällen auch andere Behörden, wie z. B. der Bürgermeister.“

(<http://www.verwaltung.steiermark.at>, letzter Zugriff: 2016-06-23)

Im Bundesland Steiermark (Österreich), ist für die Gewässeraufsichtsbehörden der Landeshauptmann, vertreten durch die Abteilung 13 (Umwelt und Raumordnung) des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung, zuständig. Diese Abteilung ist für alle Anlagen zuständig, welche im Wasserrechtsgesetz genannt sind. In allen anderen Fällen sind für Fragen dieser Art Bezirkshauptmannschaften und Magistrat Graz zuständig (Abteilung 15 der Steiermärkischen Landesregierung, 2015). Die Anlagengröße diktiert im Wesentlichen die Zuständigkeit einer Behörde.

Die Wasserrechtsbehörde darf in Vertretung des Landeshauptmannes die Tätigkeiten im Rahmen der Gewässeraufsicht, welche zu den Dienststellen der Steiermärkischen Landesregierung gehören, übernehmen. Eine solche Aufteilung der Tätigkeiten ist laut Geschäftsaufteilung der Landesregierung möglich und so wird die Abteilung 15 mit der selbstständigen Durchführung und Exekution der Gewässeraufsichtsaufgaben betraut. Diese Aufgaben beinhalten die Überprüfung von häuslichen und betrieblichen Abwasseranlagen. (Abteilung 15 der Steiermärkischen Landesregierung, 2015).

Die Einleitung von Abwasser aus kommunalen ARAs in ein Fließgewässer soll nach dem Vorgaben laut erster Abwasseremissionsverordnung (BGBl.210/1996, 1996) erfolgen, wobei die Emissionsbegrenzungen je nach Ausbaugröße der ARA (Tabelle 2-3) berücksichtigt werden müssen. Die Verordnung definiert die Emissionsbegrenzungen sowohl von ARAs als auch von Einzelobjekten, Siedlungen, Gemeinden, Wassergenossenschaften oder Wasserverbänden, deren Schmutzfrachtanfall des ungereinigten Abwassers größer als 50 EW<sub>60</sub> (1 EW<sub>60</sub> entspricht 60 g CSB/E\*d) ist. In Abhängigkeit des Bemessungswertes der ARA werden die kommunalen ARAs in vier Größenklassen untergliedert (Tabelle 2-2). Abhängig davon wurden maximal erlaubte Ablaufkonzentrationen in die Oberflächengewässer sowie parallel Mindestwirkungsgrade der Anlagen in Kombination mit der Häufigkeit der Probenahmen und der Häufigkeit der erlaubten Überschreitungen der Werte im Jahr festgelegt. Die oben genannten Kriterien gelten für Eigen- und Fremdüberwachung. (Abteilung 15 der Steiermärkischen Landesregierung, 2015).

Die allgemeine Abwasseremissionsverordnung (AAEV, 1996) weist auch auf Spezialverordnungen hin, welche insgesamt 67 Herkunftsbereiche von betrieblichem Abwasser behandeln. Die Liste dieser speziellen Abwasserarten umfasst praktisch alle gängigen Sektoren von Betrieben. Da der Geltungsbereich jeder Betriebsbranche durch eigene Verordnungen abgegrenzt wird, wird der Stand der Technik für jede dieser Sparten getrennt beschrieben, wofür eigene Emissionsbegrenzungen einzuhalten sind. Die in der Verordnung beschriebenen Reinigungstechniken sind ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Rechtsverbindlichkeit anzuwenden. (Abteilung 15 der Steiermärkischen Landesregierung, 2015)

**Tabelle 2-2:** Einteilung kommunale Abwasserreinigungsanlagen nach Größenklassen gemäß 1. AEV

Größenklasse	Definition
Größenklasse I	größer 50 bis 500 EW <sub>60</sub>
Größenklasse II	größer 500 bis 5.000 EW <sub>60</sub>
Größenklasse III	größer 5.000 bis 50.000 EW <sub>60</sub>
Größenklasse IV	größer 50.000 EW <sub>60</sub>

**Tabelle 2-3:** Maximale Ablaufkonzentrationen in mg/L in Abhängigkeit von den Größenklassen gemäß Z 1.2 aus der 1. AEV vom 06.05.2016

Messwert	Größenklasse I	Größenklasse II	Größenklasse III	Größenklasse IV
BSB5 (mg/L)	25	20	20	15
CSB (mg/L)	90	75	75	75
TOC (mg/L)	30	25	25	25
NH <sub>4</sub> – N (mg/L)	10	5	5	5
Gesamt-P (mg/L)	-	2	1	1

## **2.3. Grundlagen zur Fraktionierung des chemischen Sauerstoffbedarfs**

Kommunales Abwasser enthält eine komplexe Mischung aus organischen und anorganischen Stoffen. Dabei werden die organischen Verbindungen als wichtigster Verschmutzungsfaktor betrachtet. Üblicherweise wird der Grad der Verschmutzung mit diesen Verbindungen mit dem CSB oder BSB<sub>5</sub> ausgedrückt.

Abwassereigenschaften im Zulauf einer ARA können von Gebiet zu Gebiet deutliche Unterschiede aufweisen. Örtliche und zeitliche Unterschiede der Abwassereigenschaften können als eine Funktion unterschiedlicher Faktoren dargestellt werden. Diese Faktoren schließen auch menschliche Aktivitäten ein, die sich auf die Abwassermatrix auswirken. Die Nahrung, die wir einnehmen, und die Materialien, die wir in unseren Haushalten und in der Industrie verwenden, beeinflussen die Eigenschaften unseres Abwassers. Informationen über aktuelle Krankheiten, die Ausprägung des Umweltbewusstseins, Schwangerschaften, Medikamentenverwendung, persönliche Hygiene oder Alkoholismus können allesamt dem Abwasser entnommen werden. (Henze et al., 1987)

Die Abwassercharakterisierung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Leistung der Abwasserreinigung und besonders auf die Nährstoffelimination. Das Wissen darüber spielt eine wichtige Rolle bei der Dimensionierung einer ARA. Leistungsparameter wie z. B. die Schlammproduktion, das Volumen des Belebungsbeckens oder der Sauerstoffbedarf können in Abhängigkeit der Abwassercharakterisierung optimiert werden. Darüber hinaus ist für eine gelungene Vorhersage des Systemverhaltens das Wissen über die Abwassereigenschaften von großer Bedeutung für die Abwasserreinigung. (WERF, 2003)

Nach Bever et al. (2002) sind die Stickstoffverbindungen neben den Kohlenstoffverbindungen mengenmäßig der wichtigste Parameter der Abwasserreinigung. Die Bestimmung des Stickstoffs ist für die Sauerstoffzugabe sowohl für die biologische Stickstoff- als auch für die Phosphorelimination sehr relevant. Die Aufspaltung von Phosphor in seine Bestandteile, hinsichtlich der Phosphate im Ablauf, ist für die Einhaltung der Emissionsverordnungen und für den Klärprozess ebenfalls ausschlaggebend. Dennoch ist die Phosphorfraktionierung bis dato nur unzureichend erforscht. (WERF, 2003)

### **2.3.1. Biologische Abbaubarkeit von organischen Verbindungen**

Um die unterschiedlichen Bestandteile der organischen Verbindungen im Abwasser genauer charakterisieren zu können, wird die CSB-Fraktionierung verwendet. Dabei wird der CSB, ausgehend von seinen partikulären und gelösten Anteilen, detaillierter in Klassen bzw. Fraktionen, bezogen auf deren Partikelgröße und deren biologische Abbaubarkeit, unterteilt.

Die verschiedenen Stufen der biologischen Abbaubarkeit werden im Allgemeinen auf Grundlage der Mechanismen und Kinetik enzymatischer Reaktionen definiert. Die

nachfolgende Beschreibung wurde sinngemäß aus (Bever et al., 2002) bzw. (Mudrack & Kunst, 2003) entnommen.

Wenn die benötigten Enzyme von Mikroorganismen zum Abbau einer Substanz in ausreichender Konzentration vorliegen und kurzfristig bereitgestellt werden können, gelten diese Substanzen als biologisch leicht bzw. schnell abbaubar. Substanzen, zu deren Abbau Enzyme nicht in ausreichender Konzentration vorliegen, gelten als biologisch schwer bzw. langsam abbaubare Substanzen. Bei anthropogenen Substanzen ist ein biologischer Abbau nur teilweise möglich, da zu deren vollständigen Abbau die enzymatischen Voraussetzungen der in der Natur vorkommenden Mikroorganismen fehlen. Bei Substanzen, für die keine Enzyme zum Abbau vorliegen, spricht man von biologisch nicht abbaubaren bzw. inerten Substanzen.

Demzufolge können Abwasserinhaltsstoffe anhand ihrer biologischen Abbaubarkeit in drei Kategorien aufgeteilt werden:

- Leicht bzw. schnell abbaubare Substanzen:

Alle für den Abbau erforderlichen Enzyme sind in der Biomasse sofort in ausreichender Menge verfügbar. Zu den schnell abbaubaren Substanzen zählen z. B. flüchtige Fettsäuren und kleinmolekulare Kohlenhydrate.

- Schwer bzw. langsam abbaubare Substanzen:

In der Biomasse sind die für den Abbau erforderlichen Enzyme nicht oder in zu geringer Konzentration enthalten. Die Biomasse besitzt jedoch prinzipiell die Möglichkeit zur Elimination dieser Stoffe. Bei entsprechenden Randbedingungen können Enzyme produziert und die Stoffe abgebaut werden.

- Inerte bzw. nicht abbaubare Substanzen:

In ihrer chemischen Struktur sind sie so beschaffen, dass es keine Organismen gibt, welche die zum Abbau notwendigen Enzyme besitzen.

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer ARA wird der erzielte Wirkungsgrad der Reinigung herangezogen. In diesem Zusammenhang sind die Begriffe „leicht“, „schwer“ oder „inert“ daher immer auf die Umsetzbarkeit der betrachteten Verbindungen innerhalb der Aufenthaltszeit der Substanz (hydraulische Verweilzeit) bzw. die Verweilzeit der Bakterien (Schlammalter) in der biologischen Reinigungsstufe zu beziehen. (Bever et al., 2002).

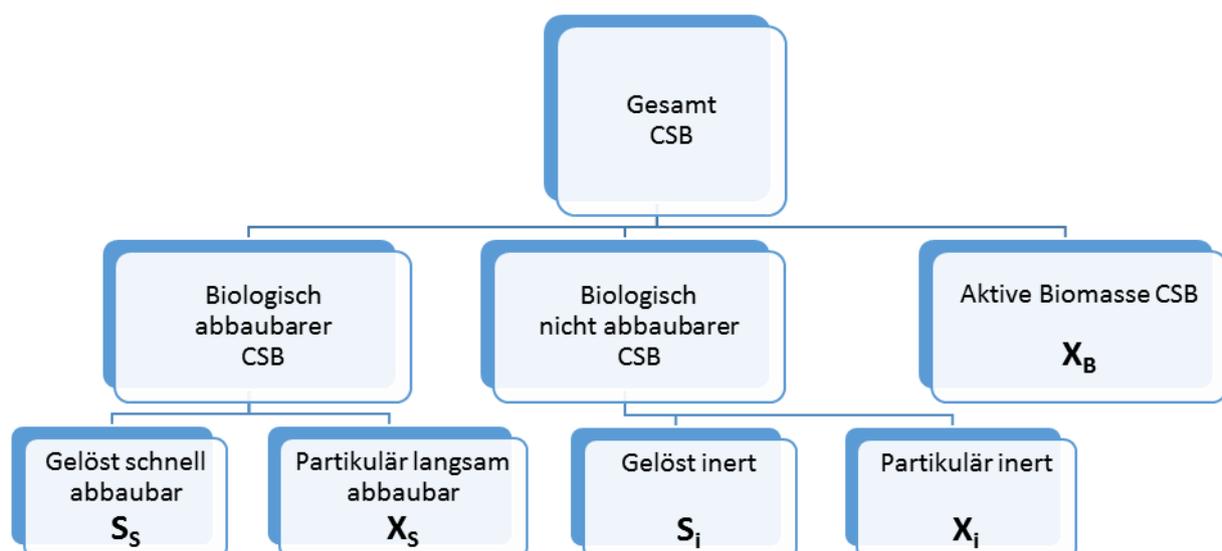
Die Fraktionierung des CSB ermöglicht, die einzelnen Subkomponenten anhand ihrer Partikelgröße und ihrer biochemischen Zerlegungsmöglichkeit zu isolieren. Für die Interpretation von Belastungsszenarien, in denen der CSB als Summenparameter verwendet wird, ist die Unterteilung des CSB in seine Komponenten (Fraktionen) erforderlich. (Sadecka et al., 2013)

Die Anwendung neuer Technologien fordert eine detaillierte Festlegung der Zusammensetzung der Abwassermatrix. Bei der Anwendung von dynamischen Simulationsmodellen von ARAs fehlt es meist an detaillierten Daten über organische Fraktionen des Abwassers. Informationen über typische Werte der CSB-Fraktionen sind jedoch ausschlaggebend für die Kalibrierung solcher Modelle. So sind CSB-Fraktionen im Zulauf zu ARAs für simulationsbasierte Größen wie das Beckenvolumen, die Verweilzeit der Feststoffe, die Qualität des Ablaufwassers oder auch die Schlammproduktion entscheidend. (Pasztor et al., 2008)

Der Begriff der CSB-Fraktionierung bezieht sich auf die Unterscheidung zwischen organischen Stoffen im Abwasser, die biologisch abbaubar oder biologisch nicht abbaubar bzw. inert sind. Die biologisch abbaubare Fraktion lässt sich weiter in eine schnell und eine langsam abbaubare Teilfraktion aufteilen. Zu den schnell abbaubaren Stoffen zählen z. B. flüchtige Fettsäuren und kleinmolekulare Kohlenhydrate, die äußerst schnell von einer Bakterienzelle weiterverarbeitet werden können. Im Gegensatz dazu benötigen langsam abbaubare Stoffe eine extrazelluläre Verdauung. Die inerte Fraktion umfasst Stoffe, die nur gering bis gar nicht auf Abwasserreinigungsprozesse reagieren. Der gelöste Teil der inerten Stoffe repräsentiert die Fraktion, die theoretisch ohne Verluste und unbehandelt vom Zulauf bis zum Ablauf aus der ARA transportiert wird. Die Stoffe, die als partikuläre inerte Fraktion bezeichnet werden, verlassen die ARA über den Überschussschlamm.

### 2.3.2. Bestandteile der CSB-Fraktionierung

In Abbildung 2-1 ist die Aufteilung des CSB in verschiedene Fraktionen gemäß des Vorschlags von (Ekama et al., 1986) dargestellt.



**Abbildung 2-1:** Aufteilung des gesamten CSB in verschiedene Fraktionen (Ekama et al., 1986, modifiziert)

Der CSB wird in fünf Fraktionen unterteilt, die die biologische Abbaubarkeit sowie den physikalischen Zustand der im Abwasser enthaltenen organischen Inhaltsstoffe widerspiegeln. Da nur ein Teil des CSB biologisch abbaubar und somit der biologischen Abwasserreinigung zugänglich ist, erfolgt zunächst eine Einteilung in die biologisch abbaubaren und nicht abbaubaren Anteile. Diese Fraktionen werden weiter in die Unterfraktionen partikulär (Symbol „X“) und gelöst (Symbol „S“) sowie biologisch abbaubar (Index „s“) und biologisch nicht abbaubar bzw. inert (Index „i“) aufgeteilt. Zudem ist die originär im Abwasser enthaltene aktive Biomasse zu berücksichtigen (Bezeichnung „X<sub>B</sub>“). Der gesamte CSB einer Abwasserprobe kann demnach vereinfacht aus der Summe dieser fünf Einzelfraktionen gebildet werden. Diese Aufteilung wird auch im deutschsprachigen Raum im Arbeitsblatt-A 131 des ATV-DWVK Regelwerks (2000) verwendet.

Der Summenparameter des gesamten CSB bildet sich wie folgt:

$$CSB = S_s + X_s + S_i + X_i + X_B \quad \text{Gleichung 2-1}$$

mit:

*CSB ... chemischer Sauerstoffbedarf (mg/L), S<sub>s</sub> ... gelöst schnell abbaubarer CSB (mg/L), X<sub>s</sub> ... partikulär langsam abbaubarer CSB (mg/L), S<sub>i</sub> ... gelöst inerter CSB (mg/L), X<sub>i</sub> ... partikulär inerter CSB (mg/L), X<sub>B</sub> ... aktive Biomasse ausgedrückt in CSB-Einheiten (mg/L);*

- CSB: Gesamter chemischer Sauerstoffbedarf (mg/L)
- S<sub>s</sub>: Gelöst schnell abbaubarer CSB (mg/L)
- X<sub>s</sub>: Partikulär langsam abbaubarer CSB (mg/L)
- S<sub>i</sub>: Gelöst inerter CSB (mg/L)
- X<sub>i</sub>: Partikulär inerter CSB (mg/L)
- X<sub>B</sub>: Aktive Biomasse ausgedrückt in CSB-Einheiten (mg/L)

Wenn der Biomassenanteil nicht separat erfasst wird, was oft der Fall ist, kann die X<sub>B</sub>-Fraktion laut Pasztor (2008) als ein Teil des X<sub>s</sub> Fraktion betrachtet werden. Aus diesem Grund wird die X<sub>B</sub>-Fraktion bei den Betrachtungen im Zuge dieser Masterarbeit vernachlässigt. Somit erhält der Anwender vier Fraktionen, welche im Rahmen dieser Masterarbeit berücksichtigt werden. Die Summe der S<sub>s</sub>- und X<sub>s</sub>-Fraktionen stellt den totalen biochemischen Sauerstoffbedarf (BSB<sub>∞</sub>) dar (Weber, 2013).

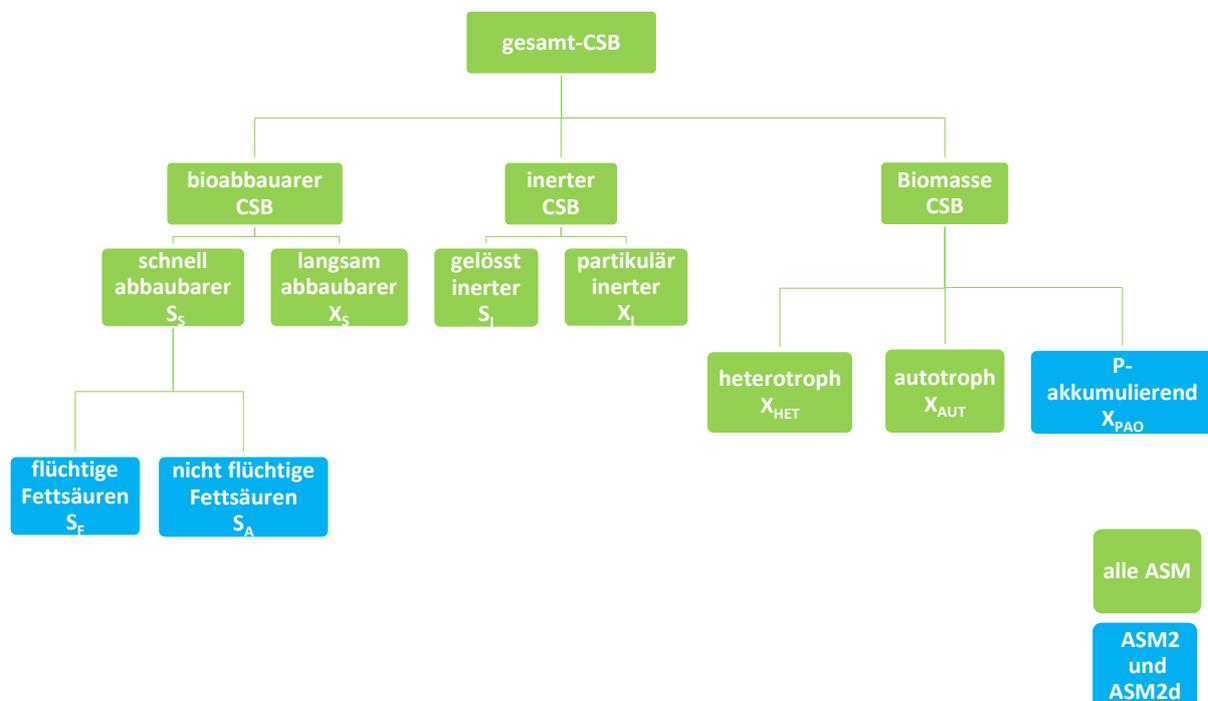
Die einzelnen Bestandteile der CSB-Fraktionierung sind essentielle Eingangsgrößen für die dynamische Simulation von ARAs. Zur Beschreibung der biokinetischen Prozesse der Abwasserreinigung werden mathematische Modelle verwendet, die auf physikalischen und chemischen Zusammenhängen in Kombination mit Annahmen und Erfahrungswerte basieren. Diese mathematischen Modelle werden in der Literatur (z. B. Henze, 2000), (Makinia, 2010), (Brdjanovic et al., 2015), (Jenkins & Wanner, 2014)) als Belebtschlamm-Modelle (Engl.: Activated Sludge Model) mit der Kurzform ASM

bezeichnet. Je nach Detaillierungsgrad dieser mathematischen Modelle sind diese durch Ziffern gekennzeichnet (z. B. ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3, etc.).

Nach dem ASM1 (Activated Sludge Model No. 1) ist es möglich auf der Basis der CSB-Fraktionierung folgenden Vorgänge zu simulieren:

- Wachstum heterotropher Organismen unter aeroben (Sauerstoff vorhanden) und anoxischen (kein gelöster Sauerstoff vorhanden) Bedingungen
- Wachstum autotropher Organismen unter aeroben Bedingungen
- Absterben heterotropher und autotropher Organismen
- Ammonifikation gelöster organischer Stickstoffverbindungen (Stickstoff wird als Ammoniak freigesetzt)
- Hydrolyse von abgestorbener Biomasse (Zerkleinerung der Biomasse unter Einwirkung der Mikroorganismen)
- Hydrolyse partikulär organischer Stickstoffverbindungen (Zerkleinerung der Stickstoffverbindungen unter Einwirkung der Mikroorganismen)

Allen Modellen liegt eine CSB-Fraktionierung auf Basis von (Ekama et al., 1986) zu Grunde, die je nach Modell einen weiterführenden Detailgrad aufweist. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

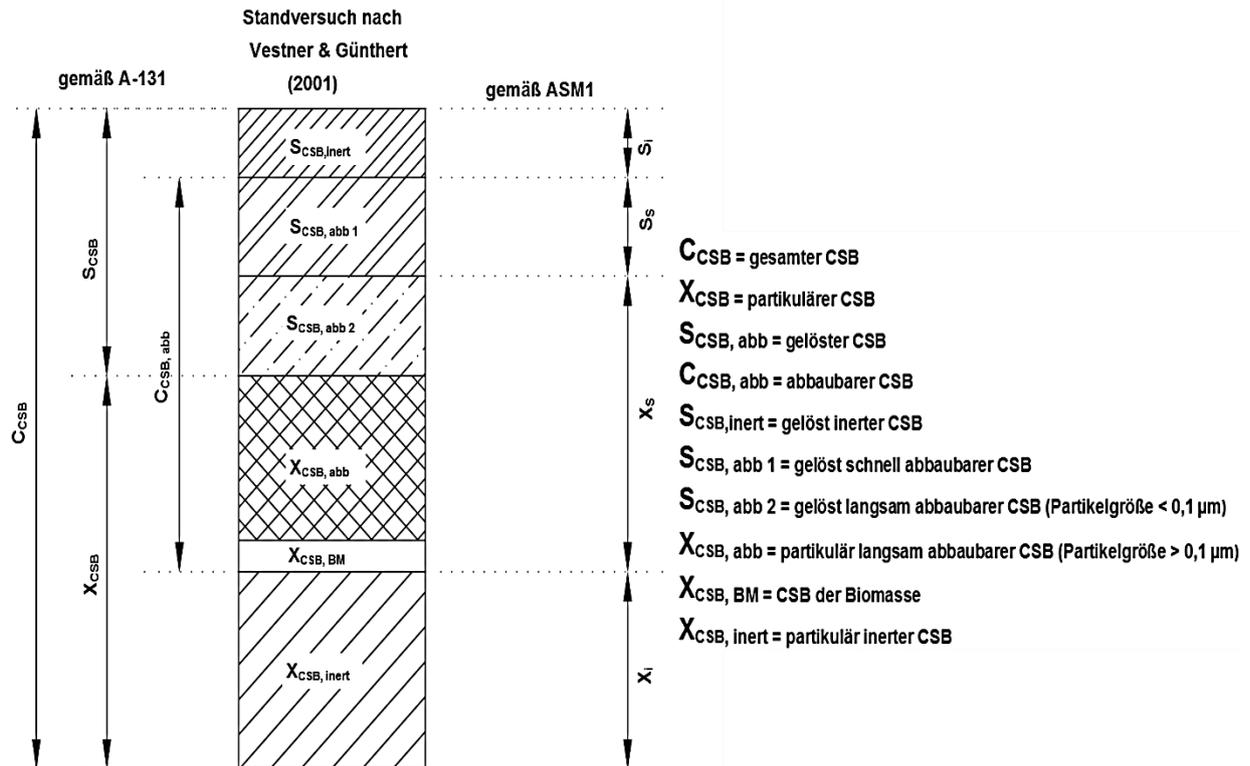


**Abbildung 2-2:** Grundlegende CSB-Fractionen von Belebtschlamm-Modellen (ASM) (Pastor et al., 2008)

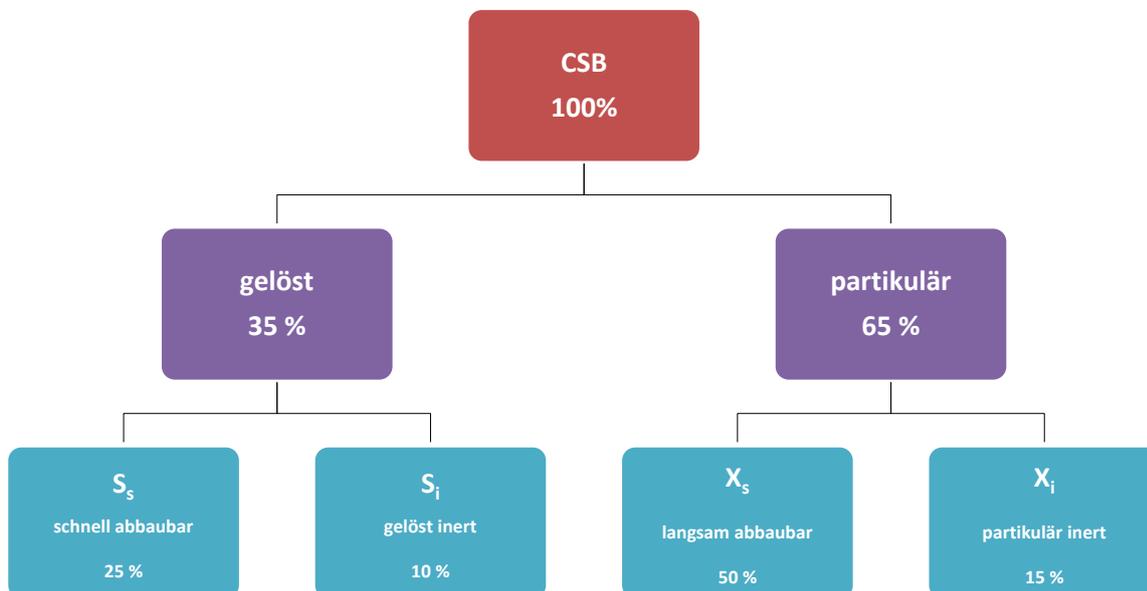
Abbildung 2-2 zeigt die Fraktionen, welche im ASM, ASM2 und ASM2d verwendet werden. Wichtig ist es zu erwähnen, dass aktuelle ASM-Modelle (ASM3, ASM3P) mehr detaillierte Informationen über CSB-Fraktionen benötigen, als es in der Abbildung 2-2 dargestellt ist. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, wird die Biomasse neben dem biologisch abbaubaren und inerten Anteil auch als ein wesentlicher Teil des CSB dargestellt. Da die phosphor-akkumulierende Biomasse und autotrophe-Biomasse mit weniger als 1 % im Zulauf der ARA beteiligt sind, werden sie im Rahmen dieser Masterarbeit vernachlässigt. Wie bereits erwähnt darf die heterotrophe Biomasse, wenn nicht separat ermittelt, als ein Teil der  $X_s$ -Fraktion betrachtet werden. Ein weiterer Grund warum die heterotrophe Biomasse vernachlässigt werden kann, ist eine sehr hohe Wachstumsrate der heterotrophen (von anderen ernährend) Mikroorganismen, so dass ein „Auswaschen“ (Absterben) nur äußerst selten stattfindet. Ebenso ist ihre Anfangskonzentration in den meisten Simulationsumgebungen bereits vorgegeben, weshalb eine Berücksichtigung dieses Anteils vernachlässigbar erscheint. Die heterotrophen Organismen verwenden die organischen Stoffe, um die Biomasse aufzubauen (Roeleveld & Loosdrecht, 2002). Autotrophe Organismen (selbsternährend) sind Mikroorganismen, welche zur Energiegewinnung den Sauerstoff und den Kohlenstoff aus dem  $\text{CO}_2$  verwenden. Diese Mikroorganismen bilden die autotrophe Biomasse, welche im Zulauf der ARA mit weniger als 1 % des gesamten CSB beteiligt ist. Aus diesem Grund wird dieser Anteil des CSB im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls außer Acht gelassen. Das Gleiche gilt auch für die phosphor-akkumulierende Biomasse, die aufgrund des geringen Prozentsatzes des gesamten CSB vernachlässigt werden kann.

Auf eine weitere Aufteilung des abbaubaren CSB in flüchtige und nichtflüchtige Fettsäuren wird im Rahmen dieser Masterarbeit verzichtet.

Da im Rahmen dieser Arbeit die Nomenklatur aus dem ASM-Bereich verwendet wird, ist es wichtig, zu erwähnen, dass die Aufteilung der Fraktionen im deutschsprachigen Raum nicht immer identisch mit der Aufteilung im englischen Sprachraum bzw. im ASM-Bereich ist. Die Aufteilungsunterschiede können aus Abbildung 2-3 entnommen werden. Abbildung 2-3 zeigt, dass der partikuläre Anteil des CSB ( $X_{\text{CSB}}$ ) gemäß DWA-A 131 etwas geringer ist, als der nach ASM1 ( $X_s + X_i$ ). Der Grund dafür ist der  $S_{\text{CSB,abb 2}}$  (kolloidale oder gelöste Fraktion deren Partikelgröße  $< 0,1 \mu\text{m}$ ), welcher laut A 131 im Gegensatz zu ASM als schnell abbaubare Fraktion betrachtet wird. Der  $X_{\text{CSB,BM}}$  repräsentiert den Anteil der Biomasse, deren Partikelgröße  $0,1 \mu\text{m}$  überschreitet. Dabei stellt der  $X_{\text{CSB,abb}}$  die Partikeln des schwer abbaubaren CSB dar, welche größer als  $0,1 \mu\text{m}$  sind.

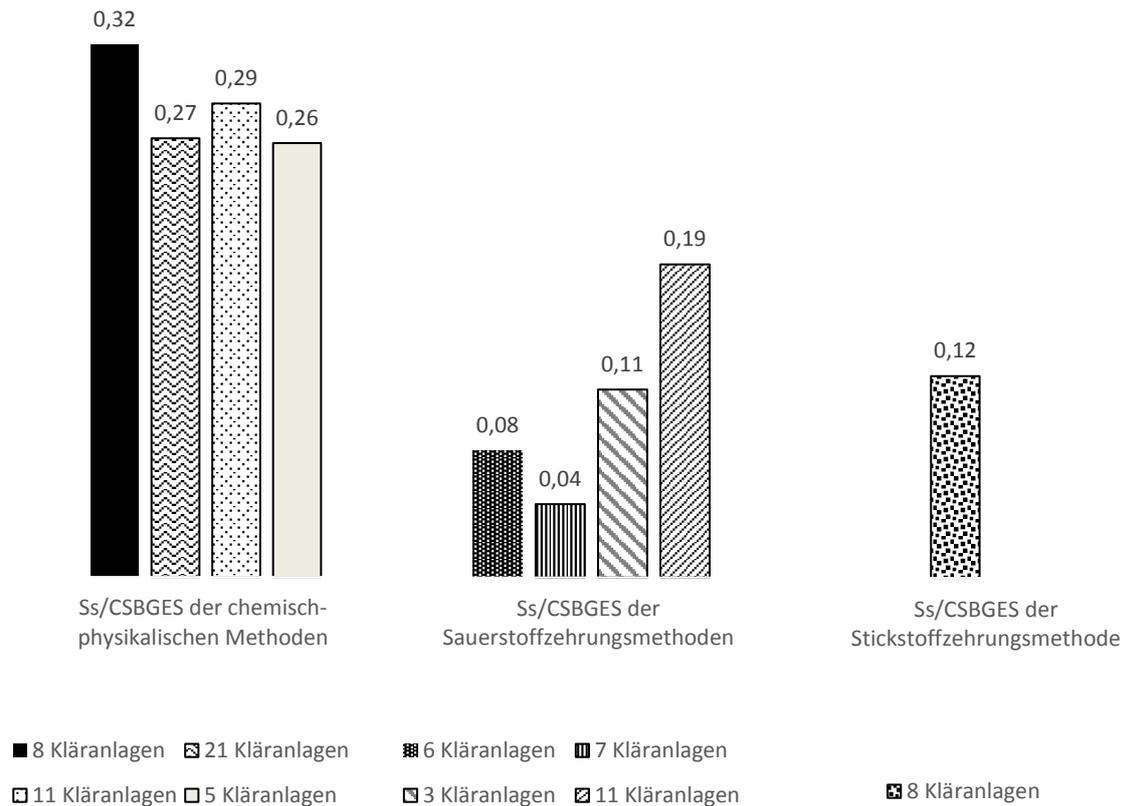


**Abbildung 2-3:** Schematische Aufteilung des Gesamt-CSB in verschiedenen Fraktionen (Vestner & Günthert, 2001)



**Abbildung 2-4:** Vereinfachte Aufteilung der CSB-Fractionen (Sadecka et al., 2013, modifiziert)

Abbildung 2-4 zeigt den überschlägigen prozentuellen Anteil jeder einzelnen Fraktion der kommunalen Abwässer aus Literaturquellen. Die genannten Ergebnisse von Sadecka (2013) basieren auf 17 Studien aus unterschiedlichen Ländern und Regionen. Ob allen Untersuchungen ähnliche Testmethoden zur Bestimmung der CSB-Fraktionen zugrunde liegen, ist nicht bekannt. An Literatur mit Daten aus identischen Versuchen aus unterschiedlichen Ländern mangelt es bis dato. Das Nichtvorhandensein eines international normierten Verfahrens erklärt, warum es keine vergleichbaren Daten basierend auf identischen Analysemethoden gibt. Ein weiterer Grund, weswegen es hierzu noch keine Norm gibt, ist die Tatsache, dass unterschiedliche Verfahrensarten völlig unterschiedliche Ergebnisse liefern können. Diese Unterschiede in den Ergebnissen zeigen deutlich, dass das Forschungsthema „CSB-Fraktionierung“ noch nicht voll ausgeschöpft ist. Das beste Beispiel hierfür ist der Unterschied zwischen einem chemisch-physikalischen Verfahren und einem Sauerstoffzehrungsverfahren zur Bestimmung gelöst leicht abbaubaren CSB-Fraktion ( $S_s$ ). Das chemisch-physikalische Verfahren basiert auf physikalischer Isolierung (Filtration) der Fraktionen anhand der Partikelgröße und der nachfolgenden Erfassung der Fraktionen anhand der chemischen Prozesse. Das zweite Verfahren (Sauerstoffzehrungsverfahren) basiert auf Beobachtung des Sauerstoffverbrauchs der Mikroorganismen in einem geschlossenen System. Diese zwei Verfahrensarten weisen deutliche Unterschiede des Verhältnisses von  $S_s$  zu CSB auf. Die oben erwähnte Diskrepanz ist in Abbildung 2-5 ersichtlich. Abbildung 2-5 zeigt, dass der Unterschied im  $S_s$ /CSB-Verhältnis zwischen 13 und 28 % betragen kann.



**Abbildung 2-5:** Mittelwerte des  $S_s/CSBGES$ -Verhältnisses in Abhängigkeit der Versuchsmethode. Dabei ist die Anzahl der behandelten Kläranlagen aus unterschiedlichen Gebieten ersichtlich. (Gillot & Choubert, 2010)

Wie bereits erwähnt, haben die CSB-Bestimmung und seine Fraktionierung viele positive Aspekte. Dennoch ist es fraglich, ob das Verfahren selbst umweltbedenklich ist. Die Frage der Umweltverträglichkeit ist auf die Verwendung giftiger Stoffe wie Quecksilber- und Chromverbindungen (Kaliumdichromat) im Rahmen der Erfassung des CSB zurückzuführen. Dies betrifft insbesondere Entwicklungsländer, in denen der unsachgemäße Umgang mit Giftstoffen besonders negative Auswirkungen auf die Natur haben kann. Ein möglicher Lösungsansatz für dieses Problem wäre die Umstellung auf den TSB (Totaler Sauerstoffbedarf) und der Verzicht auf weitere CSB-Messungen. Die Bestimmung des TSB basiert auf der thermischen Oxydation durch Verbrennung der organischen Stoffe unter hoher Temperatur (1200 C°). Da die Erfassungsmechanismen des TOC ähnlich den TSB Erfassungsmechanismen sind, wäre eine relativ einfache laboranalytische Erfassung des TSB möglich. Der Zeitaufwand wäre ein weiterer Vorteil dieses Zugangs, da das Gerät für die thermische Oxydation („TOC Analyser“) die Ergebnisse über TOC- und TSB-Konzentration in wenigen Minuten liefern kann. Ein Umstieg auf TSB ist allerdings zurzeit nicht möglich, da er hinsichtlich der Fraktionierung nicht umsetzbar ist. (Genthe & Pliner, 2015)

### 2.3.3. Fällung zur Bestimmung des gelösten CSB-Anteils

Die Fällung (Präzipitieren, Ausfällen) ist ein Prozess, in dem die gelösten Stoffe einer wässrigen Lösung durch Zusatz geeigneter Chemikalien (Fällungs- oder Flockungsmitteln) zur Gänze oder teilweise ausgeschieden werden. Die Ausscheidung dieser Stoffe in Form eines unlöslichen Niederschlags (Flocken oder Tröpfchen) ermöglicht ihre Entfernung aus der Flüssigkeit mittels einfachen mechanischen Verfahren. (Neumüller, 1979)

Eine effektivere Trennung der gelösten Stoffe ist durch die Veränderung des pH-Werts (Einstellung mittels Fällungshilfsmittel) oder durch die Veränderung der Temperatur der Flüssigkeit möglich. Hinsichtlich der CSB-Fraktionierung ist der Fällungsprozess aufgrund einer hohen Eliminationsrate der kolloidalen Stoffe wertvoll. Kolloide sind sehr kleine Partikeln (0,001 bis 10  $\mu\text{m}$ ) die eine vergleichsweise sehr große Oberfläche haben. Aufgrund dessen sind sie in der Lage, relativ viele Ionen aus ihrer Umgebung zu absorbieren. Die Trennung der kolloidalen Stoffe des CSB von gelösten Stoffen wird in den meisten Versuchsmethoden durch Fällung durchgeführt. Eine Alternative zur Fällung wäre die zweistufige Filtration mittels Membranfilter (0,45  $\mu\text{m}$  und 0,1  $\mu\text{m}$ ), welche aufgrund des Verzichts auf Chemikalien auch eine umweltfreundlichere Methode darstellt. Im Bereich der Wasserwirtschaft hängt die Trenngrenze zwischen kolloidal und gelöst laut Hoffman (2004) von der Filtergröße ab. Aus praktischen Gründen wird diese Trenngrenze auf 0,45  $\mu\text{m}$  bzw. 0,1  $\mu\text{m}$  festgelegt, da eine Filtration kleiner als 0,1  $\mu\text{m}$  aufgrund der Verstopfung des Filters nicht möglich ist.

Die Fällungsmittel, die im Rahmen der Abwasserreinigung am häufigsten zum Einsatz kommen, sind Aluminiumsulfat, Eisenchlorid, Eisensulfat, Ferrosulfat, Aluminat, Polyaluminiumchlorid und organische Polymere. (Wang et al., 2005)

Die Fällungshilfsmittel werden im Fällungsprozess dann verwendet, wenn man ein Optimum an Effektivität erzielen will. Ihre Aufgabe ist die schnellere Flockenbildung, die Produktion stärkerer und dichter Flocken sowie die Einsparung von Flockungsmitteln. Der Fällungsprozess ist durch mehrere Parameter bedingt. Faktoren, welche diesen Prozess im Wesentlichen beeinflussen, sind die Konzentration der Kolloide, die Dosierung des Fällungsmittels, das Zeta-Potenzial (elektrisches Potenzial der Kolloide), die Anziehung der Kolloide zum Wasser, der pH-Wert, die Konzentration der Anionen bzw. Kationen und die Temperatur. (Wang et al., 2005)

Nachstehend sollen die im Hinblick auf die CSB-Fraktionierung relevanten Faktoren des Fällungsvorgangs genauer beschrieben werden.

#### *Dosierung des Fällungsmittels*

Die Beziehung zwischen der Dosis der Fällungsmittel und der Effizienz der Flockung ist laut Wang et al. (2005) in vier Phasen aufgeteilt. Die Dosis der Flockungsmittel wird phasenweise allmählich angehoben.

Zone 1: Nicht genügend Fällungsmittel für die Destabilisierung der Kolloidal-Flüssigkeit.

Zone 2: Zugabe der ausreichenden Menge des Fällungsmittels, um erwähnte Destabilisierung zu erreichen.

Zone 3: Überschüssige Konzentration des Fällungsmittels führt zur Ladungsumkehrung und Restabilisierung der kolloidalen Partikeln.

Zone 4: Übersättigung mit der Metall-Hydroxid-Fällung schließt die kolloidalen Partikeln ein und ergibt eine effektive Flokkulation.

#### *pH-Wert*

Der pH-Wert wird beim Fällungsvorgang üblicherweise mit Natriumhydroxid eingestellt. Die optimalen pH-Werte für das metallische Fällungsmittel sind der Tabelle 2-4 zu entnehmen.

**Tabelle 2-4:** Optimale pH-Werte des metallischen Fällungsmittels (Wang et al., 2005)

<b>Fällungsmittel</b>	<b>pH-Wert</b>
Aluminiumsulfat	4,0 – 7,0
Eisen (II)-sulfat	8,5 und höher
Eisenchlorid	3,5 – 6,5 und höher
Eisen (III)-sulfat	3,5 – 7,0 und höher

#### *Temperatur*

Die Effektivitätsrate der Fällung steigt mit höherer Temperatur. Dies ergibt sich aus den folgenden physikalischen Tatsachen:

- Erhöhung der Geschwindigkeit und der kinetischen Energie der Moleküle
- Erhöhung der Rate der chemischen Reaktionen
- Schnellere Flockenbildung
- Verringerung der Wasserviskosität
- Änderung der Flockenstruktur infolge größerer Agglomeration

#### **2.3.4. Filtration zur Bestimmung des gelösten CSB-Anteils**

Laut Torrijos et al. (1994) wurde die 0,1 µm-Filterporenweite als die Trennschärfe zwischen kolloidal und gelöst festgestellt. Darüber hinaus bietet sich die zweistufige Filtration als ein Lösungsansatz der physikalischen Trennung der kolloidalen Stoffe an. Nach dieser Vorgehensweise wird das Abwasser in der ersten Stufe mit dem 0,45 µm-Filter und nachfolgend mit einem 0,1 µm-Filter filtriert. Die Filtration mit dem 0,45 µm-Filter wird als Vorstufe zur Filtration mittels 0,1 µm-Filter durchgeföhrt, um einer eventuellen Verstopfungsgefahr vorzubeugen.

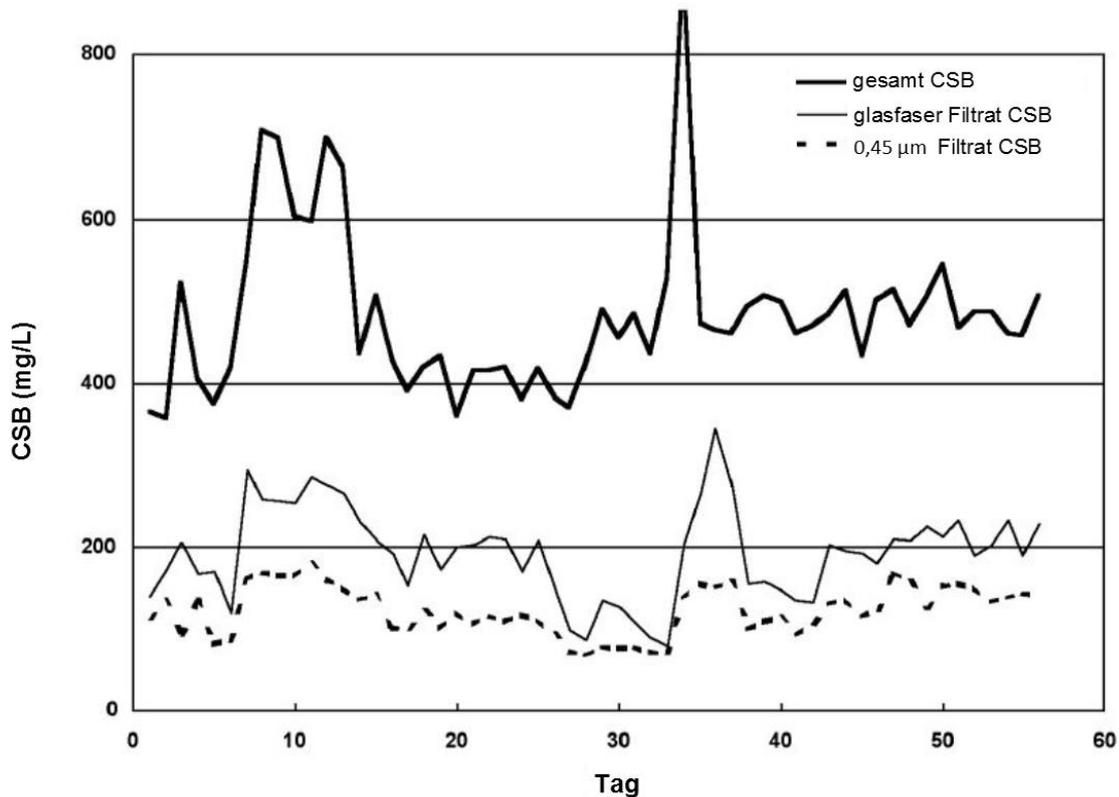
### **3. Messmethoden zur Fraktionierung des chemischen Sauerstoffbedarfs CSB**

Die verschiedenen Messmethoden zur Bestimmung der einzelnen Fraktionen des CSB können in zwei Hauptkategorien aufgeteilt werden. Die erste Kategorie umfasst direkte Messmethoden, welche die Verwendung einer analytischen Vorgehensweise vorschreiben. Zur zweiten Kategorie gehören die indirekten Messmethoden, bei welchen die Informationen aus der Beobachtung physikalischer oder biologischer Phänomene abgeleitet werden können.

Indirekte Methoden, die z. B. akustische (Ultraschall) oder fotometrische (Lichtschwächung) Eigenschaften des Abwassers analysieren, sind in letzter Zeit durch die Weiterentwicklung von Messequipment und wegen ihres geringen Zeitaufwandes sehr beliebt geworden. Die biologischen Untersuchungen (z. B. Beobachtung des Sauerstoffverbrauchs) oder auch physikalische (Filtration) und physikalisch-chemische (Filtration und Fällung) Untersuchungen sind u. a. indirekte Methoden, welche zur Bestimmung der CSB-Fraktionen verwendet werden. Im Wesentlichen diktieren finanzielle oder infrastrukturelle Rahmenbedingungen die Wahl der Versuchsmethodik.

Die Konzentrationsanalyse des CSB wird an filtrierten sowie an unfiltrierten Abwasserproben durchgeführt. Aus diesem Grund ist es sehr wichtig zu definieren, was der Begriff „gelöst“ im Bereich der Abwasseranalyse genau bedeutet. In manchen Fällen impliziert der Begriff „gelöst“ Partikeln, die eine Filterporenweite von 0,45 µm noch passieren können. Laut WERF (2003) kann auch ein Glasfaserfilter mit einer Größe von 1,2-1,5 µm verwendet werden (z. B. bei der AFS-Bestimmung). Die Ergebnisse eines solchen Versuchs können sich deutlich von einem Versuch mit einem 0,45 µm-Filter unterscheiden. Im Gegensatz dazu wird im deutschsprachigen Raum grundsätzlich ein 0,45 µm-Filter zur AFS-Bestimmung verwendet. Aus diesem Grund ist es essenziell, anzugeben, welcher Filter zum Einsatz kam, wenn der Begriff „gelöst“ verwendet wird. Besonders wichtig ist diese Unterscheidung für das Thema dieser Masterarbeit, weil CSB-Fraktionen aufgrund ihrer kolloidalen Anteile sehr sensitiv im Hinblick auf die Filterporenweite sind. Dies liegt daran, dass der Rückstand kolloidaler Partikel bzw. die Durchdringung des Filters sehr stark vom Filtertyp abhängig ist. Abbildung 3-1 zeigt die CSB-Konzentration, die 0,45 µm- und 1,2 µm-Filter passieren können. Aus der Abbildung 3-1 kann ebenfalls der Vergleich der CSB-Konzentration des Filtrats mit der gesamten CSB-Konzentration abgelesen werden. Abbildung 3-1 zeigt, dass die CSB-Konzentration des Filtrats stark von der Filterporenweite abhängig ist. (WERF, 2003)

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde mit einer Filtergröße von 0,1 µm experimentiert, welche laut Torrijos et al. (1994) als Trennschärfe zwischen gelösten und partikulären Stoffen angesehen werden kann.



**Abbildung 3-1** : Gesamt-CSB im Zulauf (unfiltriert), CSB-Glasfaser-Filtrat 1,2 µm und CSB-Filtrat 0,45 µm von kommunalem Abwasser (WERF, 2003)

### 3.1. Bestimmung des gelösten, schnell abbaubaren CSB ( $S_s$ )

Nach Pasztor et al. (2008) macht der leicht abbaubare Anteil im Zulauf einer ARA 3- 35 % des gesamten CSB des Rohabwassers aus (Ergebnisse basieren auf 17 Studien aus unterschiedlichen Ländern und Regionen). Nach der Sedimentation liegt der Prozentsatz des schnell abbaubaren CSB sogar im Bereich zwischen 14 und 57 %. In den Belebtschlamm-Modellen ASM2 und ASM2d teilen sich diese Komponenten auf flüchtige Fettsäuren (Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure etc.) und nichtflüchtige Fettsäuren (Alkohol, niedrige Aminosäuren, einfache Kohlenhydrate) auf. Der Anteil der Fettsäuren liegt zwischen 0 und 8,8 % bzw. zwischen 0 und 16 %. Diese Fraktion des CSB ist für heterotrophe Organismen sehr leicht verwertbar.

Die Quantität der  $S_s$ -Fraktion kann für das Volumen des anoxischen und anaeroben Belebungsbeckens auf Kläranlagen entscheidend sein, da der Prozess der Phosphatfreigabe sehr sensibel auf leicht abbaubares Substrat ist. Es ist wichtig zu erwähnen, dass bei dieser Fraktion sehr leicht Bestimmungsfehler auftreten können, da die Subfraktionen des  $S_s$  als chemisch instabil gelten.

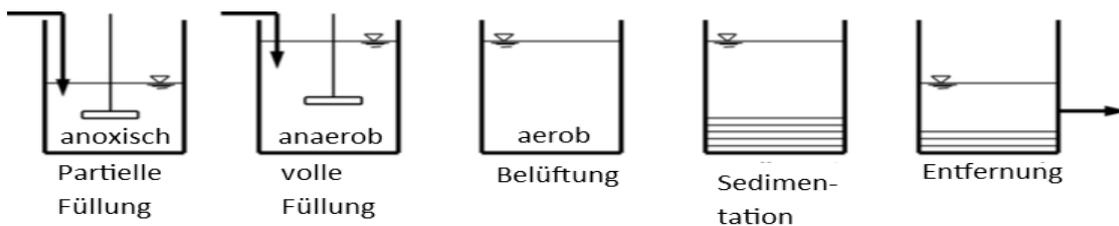
Bei der Bestimmung der  $S_s$ -Fraktion haben sich drei Erfassungsarten bewährt. Die Sauerstoffzehrungsmethode ist wahrscheinlich die praktisch am einfachsten durchzuführende Methode, da sie wenig laboranalytische Arbeit verlangt und auch in situ durchgeführt werden kann. Um diese Methode durchführen zu können, wird analytische Laborarbeit und Nachahmung eines biologischen Systems benötigt. Die  $S_s$ -Fraktion wird anhand der Analyse des Sauerstoffverbrauchs erfasst. (WERF, 2003)

Eine weitere Methode, die auf Sauerstoffzehrung basiert, ist die „Oxygen Uptake Rate OUR Response“ (Reaktion auf die Sauerstoffzehrungsrate), welche die Reaktion der Mikroorganismen auf die Konzentration des schnell abbaubaren Substrats analysiert. Die dritte Erfassungsart, die sich bewähren konnte, ist die chemisch-physikalische Bestimmung. Diese Methode basiert in erster Linie auf der physikalischen Trennung unterschiedlicher Partikeln nach ihrer Größe.

### 3.1.1. Methode der Sauerstoffzehrung zur Bestimmung der $S_s$ -Fraktion

Die meistverwendeten Messmethoden der Sauerstoffzehrung sind die „Aerobic Batch“-Methode und die „Sequencing Batch Reactor“-Methode. Die beiden Methoden werden im Labormaßstab durchgeführt. Die Interpretation des Sauerstoffverbrauchs in einem System unter kontrollierten Bedingungen (Sauerstoffzugabe, Abwasservolumen etc.) bildet den Schwerpunkt dieser Methode. In diesen Methoden wird ein bestimmtes Volumen des Abwassers, dessen CSB-Wert bekannt ist, mit einem gemessenen Volumen des Belebtschlamms in einem Laborreaktor mit Belüpfungsfunktion zusammengebracht. Um ausgeprägte Verbrauchsspitzen des gelösten Sauerstoffs zu vermeiden, wird die Geschwindigkeit des Mischvorgangs dementsprechend angepasst. Die Sauerstoffzehrung wird gleich zu Beginn und dann in Intervallen von einigen Minuten gemessen. Im Fokus dieses Versuchs steht die Darstellung der Sauerstoffzehrung über die Dauer der Versuchszeit.

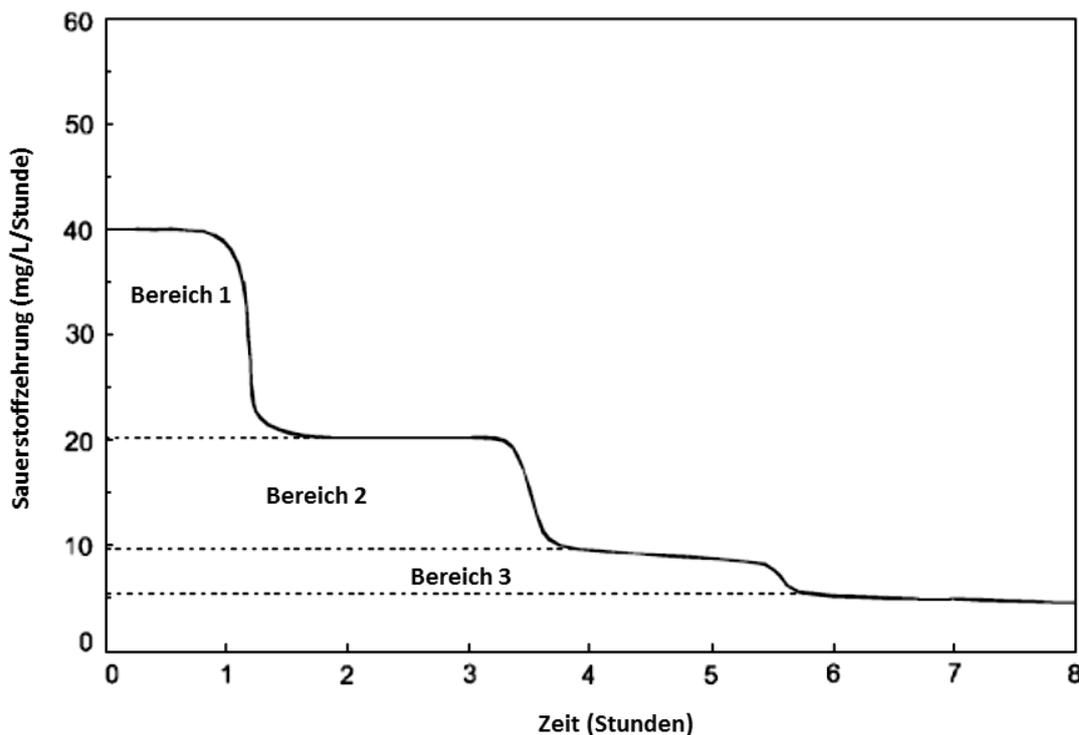
Die am weitesten verbreitete Methode zur Messung der Sauerstoffzehrung ist die „Sequencing Batch Reactor“-Methode (SBR). Abbildung 3-2 zeigt den Ablauf eines SBR-Versuchs. Im Unterschied zur kontinuierlichen (Aerobic Batch Method) Beschickung des Abwassers zum Reaktor wird das Abwasser in diesem Versuch als eine Charge im Reaktor behandelt. Ein einfacher Zyklus besteht aus den Teilschritten: Füllen (anoxisch), Füllen und Mischen (anaerob), Belüftung (aerob) und Sedimentation und Entfernung des behandelten Abwassers. (Kroiss et al., 2011)



**Abbildung 3-2:** Ablauf eines SBR-Versuchs (Kroiss et al., 2011, modifiziert)

Im Unterschied zu "Aerobic Batch Method" und SBR-Methode gibt es auch Methoden, die auf der Zugabe des Belebtschlammes verzichten und sich auf rein heterotrophe Organismen im Abwasser verlassen.

Der Idealfall einer Sauerstoffzehrung im Rahmen eines SBR-Versuchs ist in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Fläche unter der Kurve ist in vier Bereiche aufgeteilt. Bereich 1 zeigt die Menge des Sauerstoffs an, welche für den Abbau von  $S_s$  aufgewendet wurde. Bereich 2 gibt die Menge des Sauerstoffs an, welche für die Nitrifikation gebraucht wurde. In Bereich 3 kann die Menge des Sauerstoffs, welche für den Abbau von  $X_s$  eingesetzt werden musste, abgelesen werden. Die restliche Fläche gibt Auskunft über die Sauerstoffmenge, welche mit der endogenen Respiration verbunden ist.



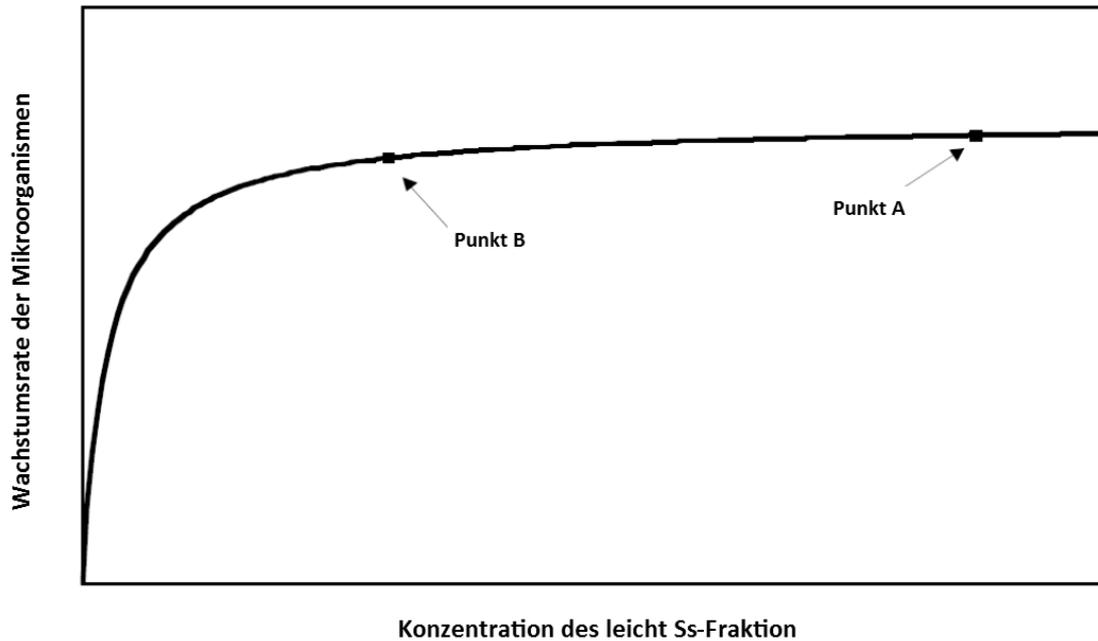
**Abbildung 3-3:** Idealierte Sauerstoffzehrungskurve in einem Sequencing Batch Reactor (SBR) (WERF, 2003)

All diese Methoden basieren auf dem Sauerstoffverbrauch und erfolgen unter exakt definierten Laborbedingungen. Eine genaue Beschreibung der unterschiedlichen Sauerstoffzehrungsmethoden kann in der einschlägigen Fachliteratur gefunden werden (Spanjers et al., 1998).

### 3.1.2. Methode der Sauerstoffzehrungsrate zur Bestimmung der $S_s$ -Fraktion

Die Grundlage der Methode der Sauerstoffzehrungsrate (Engl.: Oxygen Uptake Rate OUR) bildet die Überlegung, dass der Sauerstoffverbrauch der gelöst leicht abbaubaren CSB-Fraktion  $S_s$  isoliert und gemessen werden kann. Die Annahme, dass eine bestimmte Menge an Sauerstoff pro  $S_s$ -Einheit verbraucht wird, ermöglicht anhand der zugehörigen Sauerstoffmenge eine Schätzung der  $S_s$ -Konzentration zu Beginn des

Versuchs. Aufgrund der Möglichkeit, die Sauerstoffzehrung von  $S_s$  isolieren können, wird die Sauerstoffzehrungsrate beobachtet. Die  $S_s$ -Konzentration wird in diesem Fall aus dem Verhältnis der Modellstruktur und der Kinetik der Substratentfernung (sowie auch der restlichen Sauerstoffverbrauchsprozesse) errechnet, da die Entfernung von  $S_s$  stark vom Sättigungstyp abhängig ist. Dieser Zusammenhang zwischen der Wachstumsrate der Organismen und der  $S_s$ -Konzentration ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Zeitachse in der Abbildung von links nach rechts verläuft.



**Abbildung 3-4:** Zusammenhang zwischen Wachstumsrate der Organismen und der Konzentration der gelösten, leicht abbaubaren CSB-Fraktion  $S_s$  (WERF, 2003)

Zu Beginn des Versuchs sind die Konzentration und der Verbrauch der  $S_s$ -Fraktion durch die Mikroorganismen an ihrem Maximum (Punkt A). Die Wachstumsrate der Mikroorganismen bleibt konstant, bis die Konzentration von  $S_s$  auf den Punkt B reduziert wird. Danach folgt ein starker Abfall der Wachstumsrate, bis die restliche Menge an  $S_s$  verbraucht ist. Darüber hinaus ist der Sauerstoffverbrauch in Bezug auf  $S_s$  direkt mit der Wachstumsrate der Mikroorganismen verbunden. Ein derartiger Versuch dauert solange, bis  $S_s$  vollständig aufgebraucht ist. (WERF, 2003)

### 3.1.3. Chemisch-physikalische Methoden zur Bestimmung der $S_s$ -Fraktion

Wie bereits erwähnt, besteht der gelöste, schnell abbaubare CSB aus Partikeln, deren Molekulargröße relativ klein ist. Deswegen können diese schneller von der Zelle absorbiert und abgebaut werden. Da die restlichen Fraktionen des CSB aus größeren und komplexeren kolloidalen Stoffen bestehen, können die gelösten Fraktionen des CSB nach ihrer physikalischen Größe isoliert (Filtration) werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Erfassung von  $S_s$ , ohne ein biologisches System simulieren zu

müssen, wie es bei den Methoden der Sauerstoffzehrung oder der Sauerstoffzehrungsrate der Fall ist. Für Industrieabwässer ist diese physikalische Separation der Partikel untauglich, weil diese Abwässer eine große Anzahl an gelösten Komponenten unterschiedlicher Abbaugrade enthalten können. Aus diesem Grund sind die zuvor genannten Methoden der Sauerstoffzehrung und der Sauerstoffzehrungsrate für Zwecke der Industrieabwasserreinigung besser geeignet. (WERF, 2003)

Die Filtration ist eine Methode der Separation. Allerdings entfernt eine Filtration mit Standardfiltern (0,45  $\mu\text{m}$  Membranfilter) nicht alle kolloidal gelösten Stoffe aus dem Abwasser. Fraktionen, welche den Standardfilter passieren können, sind gelöste, schnell abbaubare ( $S_s$ ) oder gelöste, inerte ( $S_i$ ) Fraktionen und ein Teil der langsam abbaubaren CSB-Fraktionen ( $X_s$ ). (WERF, 2003)

Es gibt drei Zugänge zur Isolation des  $S_s$  mittels chemisch-physikalischer Methoden:

- Fällung vor der Filtration (ffCSB): Diese Methode verwendet eine Fällung und Ausflockung der kolloidalen Stoffe in der Abwasserprobe vor der Filtration (0,45  $\mu\text{m}$  Filter), um die gelösten kolloidalen Stoffe aus dem Abwasser zu entfernen. Die Abkürzung ffCSB deutet auf jene CSB Konzentration in einer Probe hin, welche vor der CSB-Bestimmung zuerst gefällt und dann mit einem 0,45  $\mu\text{m}$  Filter behandelt wurde.
- Trennung der kolloidalen und partikulären Stoffe durch Filtration: Dieser Zugang verwendet eine Filtration mit 0,1  $\mu\text{m}$ -Membranfilter statt einer Flokkulation, um die kolloidalen und partikulären Stoffe aus der Abwasserprobe zu entfernen. Die Annahme, dass eine Filtergröße von 0,1  $\mu\text{m}$  die Trennschärfe zwischen löslichen und kolloidalen Stoffen ist, liegt dieser Vorgehensweise zugrunde. Diese Messmethode, ist von der „Dutch Foundation for Applied Water Research“ (STOWA) nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) untersucht worden.
- Ultrafiltration: Dieses Konzept basiert auf der Separation der  $S_s$ -Fraktion mithilfe einer Ultrafiltrationsmembrane, welche die Partikel anhand der unterschiedlichen Molekulargewichte abtrennt. Die Schwierigkeit bei dieser Methode liegt in der richtigen Auswahl der Trennschärfe der Membran. Da die Partikeln der kommunalen Abwässer eine große Bandbreite an molekularen Größen und Gewichten aufweisen, ist es eine Herausforderung, eine Membran zu wählen, die kolloidale Stoffe abfiltriert.

Jede dieser Methoden wird parallel für die Erfassung der gelöst inerten Fraktion verwendet. Um den  $S_s$  aus dem Zulauf der ARA zu isolieren, wird die gleiche Methode auf das Abwasser im Ablauf angewendet. Ausgehend von der Vermutung, dass das Abwasser nach einer biologischen Abwasserbehandlung nur noch gelöst inerte Partikel enthält, bietet sich damit eine Möglichkeit, den  $S_s$  aus der Differenz zu errechnen (Gleichung 3-1). Das Schlammalter soll bei allen Methoden drei Tage nicht überschreiten. (WERF, 2003)

$$S_s = \text{Zulauf CSB}(S_s + S_i) - \text{Ablauf CSB}(S_i)$$

**Gleichung 3-1**

mit:

$S_s$  ... Konzentration des gelösten, leicht abbaubaren CSB (mg/L), Zulauf CSB ( $S_s + S_i$ ) ... gemessener CSB aus dem Zulauf der ARA (mg/L), Ablauf CSB ( $S_i$ ) ... gemessener CSB aus dem Ablauf der ARA (mg/L)

### 3.2. Bestimmung des partikulären, langsam abbaubaren CSB ( $X_s$ )

Die nur biologisch langsam abbaubare Komponente  $X_s$  umfasst komplexe organische Verbindungen, welche mittels extrazellulärer Enzyme hydrolysiert werden müssen, um von den Bakterien aufgenommen werden zu können. Ein Teil des  $X_s$  besteht aus gelösten Stoffen. Darüber hinaus ist eine reine physikalische Erfassung dieser Fraktion nicht durchführbar. Den industriellen Abwässern müsste ein vollständiges Kapitel über die  $X_s$ -Fraktion gewidmet werden, da sie eine größere Bandbreite an  $X_s$ -Komponenten aufweisen (WERF, 2003). Allerdings wird im Rahmen dieser Masterarbeit Abwasser industrieller Herkunft nicht berücksichtigt.

Hinsichtlich der Dimensionierung von ARAs ist  $X_s$  als größter Sauerstoffverbraucher im Belebungsbecken zu nennen. Der Prozentsatz dieser Fraktion beträgt 28 bis 78 % im Zulauf und zwischen 24,5 und 65 % nach der Sedimentation. Die genannten Ergebnisse basieren auf 17 Studien aus unterschiedlichen Ländern und Regionen. (Pastor et al., 2008)

Gelangt der kolloidale Anteil des  $X_s$  zum Belebtschlamm, wird er von den Flocken schnell absorbiert und zusammen mit dem Überschussschlamm aus der Flüssigkeit entfernt. Das „Schicksal“ der Kolloide und Feststoffe ist eng mit dem von  $X_s$  verbunden. Daher ist die Unterscheidung zwischen kolloidal und partikulär in Bezug auf  $X_s$  für das Modellieren des Belebungsbeckens überflüssig, weil diese beiden Anteile als eine Fraktion betrachtet werden können. Diese Fraktion wird im Nachklärbecken nur als partikuläre Fraktion betrachtet. (WERF, 2003)

Die Unterscheidung zwischen kolloidalem und partikulärem  $X_s$  ist eher für das Vorklärbecken relevant. Ein Beispiel dafür ist der Entfernungsgrad der organischen Stoffe aus dem Vorklärbecken. In dem Fall ist das Verhältnis zwischen partikulär und kolloidal aufgrund der Absetzbarkeit ein wichtiger Parameter. Das Modellieren des Vorklärbeckens soll zusammen mit diesem Verhältnis wie auch mit der CSB-Fracht bei der Dimensionierung des Belebungsbeckens berücksichtigt werden.

Es gibt hierfür zwei Methoden, welche die WERF (2003) vorschlägt. Eine davon besteht in der Aufspaltung der  $X_s$  auf weitere Subkomponenten und basiert auf der Abschätzung einiger Komponenten mittels Simulation. Die Alternative zu dieser Methode umfasst eine analytischere Vorgehensweise.

### 3.2.1. Näherungsweise Bestimmung der $X_s$ -Fraktion und LACSB

Die Konzentration des partikulär langsam abbaubaren CSB ( $X_s$ ) lässt sich aus der Differenz der gemessenen Daten der ARA sowie der abgeschätzten Parameter des Zulaufs ermitteln. Diese Bestimmungsmethode berücksichtigt den kolloidalen Anteil des langsam abbaubaren CSB. Die Menge des LACSB (langsam abbaubarer CSB inklusive kolloidaler Stoffe) wird mit der folgenden Formel errechnet:

$$\begin{aligned} LACSB &= X_s + S_{KOL} && \text{Gleichung 3-2} \\ &= (1 - f_{ss} - f_{si} - f_{xi}) * CSB_T \end{aligned}$$

mit:

$f_{ss}$  ... Prozentsatz der  $S_s$  Fraktion des CSB (%),  $f_{si}$  ... Prozentsatz gelöst inerter Fraktion des CSB (%),  $f_{xi}$  ... Prozentsatz partikulär inerter Fraktion des CSB (%),  $CSB_T$  ... Konzentration des gemessenen gesamten CSB (mg/L),  $X_s$  ... Konzentration des langsam abbaubaren partikulären CSB (mg/L),  $S_{KOL}$  ... Konzentration des langsam abbaubaren kolloidalen CSB (mg/L), LACSB ... Konzentration des langsam abbaubaren CSB inklusive kolloidaler Stoffe (mg/L)

Gleichung 3-2 zeigt, dass der LACSB berechnet werden kann, wenn die Parameter  $f_{ss}$ ,  $f_{si}$  und  $f_{xi}$  bekannt sind. Prozentsätze der CSB-Fractionen wie  $f_{ss}$ , und  $f_{xi}$  werden zur Ermittlung des langsam abbaubaren CSB aus dem Versuch der „Aerobic Batch Method“ beziehungsweise aus den Simulationen entnommen (WERF, 2003). Der  $f_{si}$  wird in diesem Falle abgeschätzt und beträgt für kommunale Abwasser laut WERF (2003) 13 %.

Nach Bedarf kann zwischen kolloidalen und partikulären Stoffen unterschieden werden. Die Aufteilung des CSB auf einen kolloidalen und einen partikulären Anteil kann mittels Prozentsatz der langsam abbaubaren Fraktion ( $f_{xs}$ ) bestimmt werden:

$$X_s = f_{xs} * LACSB \quad \text{Gleichung 3-3}$$

$$S_{KOL} = (1 - f_{xs}) * LACSB \quad \text{Gleichung 3-4}$$

mit:

$f_{xs}$  ... Prozentsatz der langsam abbaubaren CSB (%),  $X_s$  ... Konzentration der langsam abbaubaren partikulären CSB (mg/L), LACSB ... Konzentration des langsam abbaubaren CSB inklusive kolloidaler Stoffe (mg/L),  $S_{KOL}$  ... Konzentration des langsam abbaubaren kolloidalen CSB (mg/L)

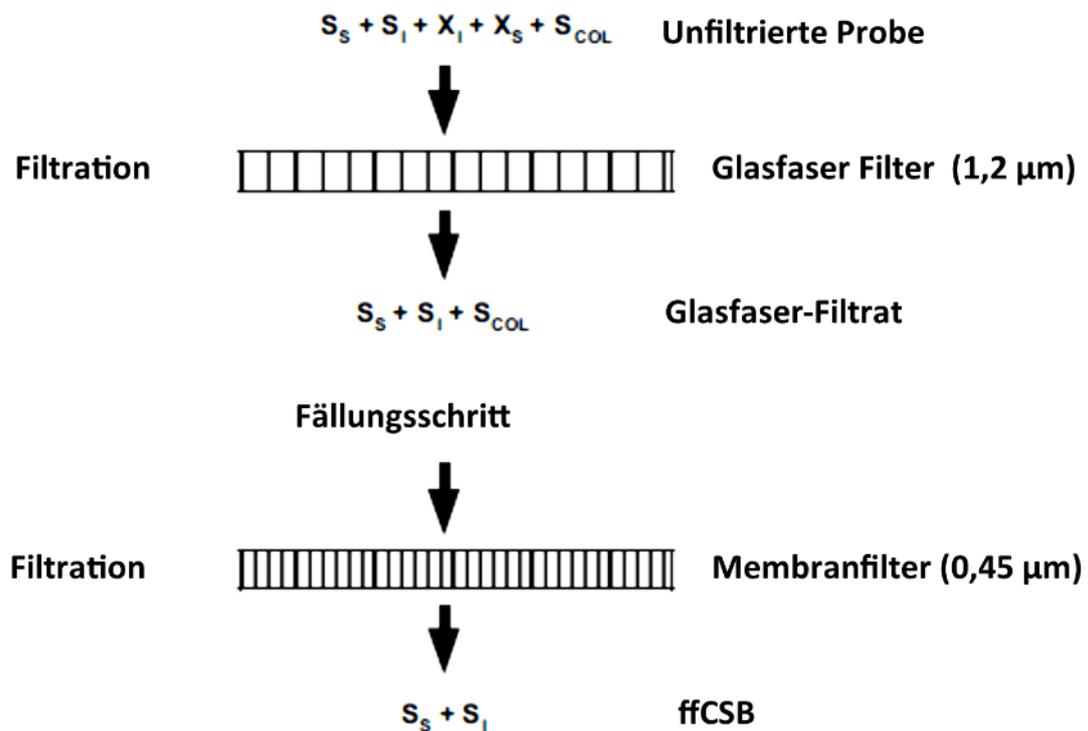
Wenn der Prozentsatz  $f_{xs}$  des  $X_s$  bekannt ist, kann durch die Gleichung 3-3 und Gleichung 3-4 der partikuläre und kolloidale Anteil des langsam abbaubaren CSB errechnet werden.

Die  $f_{xs}$ -Fraktion kann ermittelt werden, wenn folgende Daten bekannt sind:

- CSB-Konzentration im Zulauf. Die CSB-Konzentration bezieht sich auf die bekannte dotierte Menge des CSB aus der Simulation.
- CSB-Messung des Filtrats nach Filterung mittels 1,2 µm-Filter zur Ermittlung des AFS/Glühverlust-Verhältnisses.

- Geschätzte  $f_{ss}$ ,  $f_{si}$  und  $f_{xi}$  Fraktionen (Typische Zulauffraktionen laut WERF (2003)).

Eine nähere Beschreibung dieser Methode ist in WERF (2003) dargestellt. Die Aufteilung in einen kolloidalen und einen partikulären Anteil des  $X_s$  kann nicht mithilfe einer direkten Methode erreicht werden. In diesem Sinne kann die Aufteilung nicht mittels Filtration durchgeführt werden, weil die  $X_i$ - und  $X_s$ -Fraktionen nicht auf diese Weise voneinander getrennt werden können. Die erwähnte Problematik ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Die Abbildung zeigt jene Fraktionen, die von einem  $0,45 \mu\text{m}$ - beziehungsweise von einem  $1,2 \mu\text{m}$ -Filter zurückgehalten werden können. (WERF, 2003)



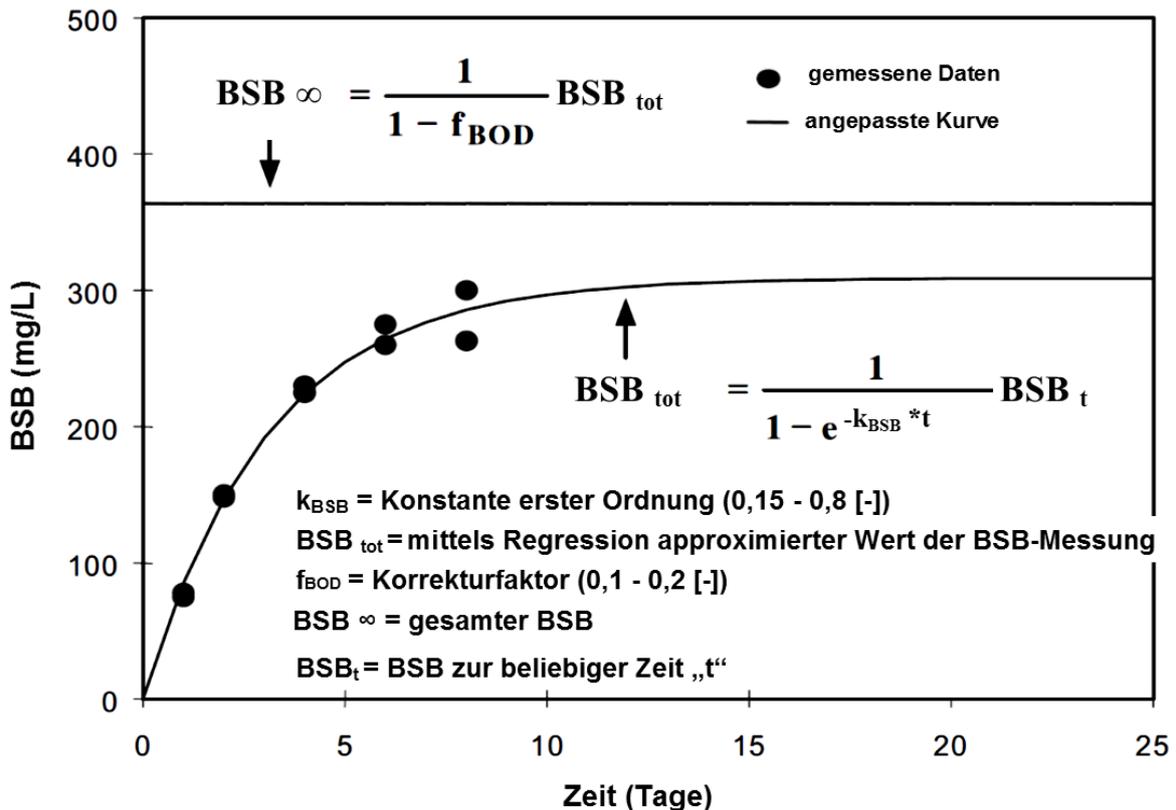
**Abbildung 3-5:** Das Abfiltrieren von rohem Abwasser durch  $0,45 \mu\text{m}$  beziehungsweise  $1,2 \mu\text{m}$  Filter mit dem Fällungsschritt (WERF, 2003)

### 3.2.2. BSB-Test zur Bestimmung der $X_s$ -Fraktion

Die Richtlinie nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) zur Abwassercharakterisierung stellt eine Methode zur Erfassung des partikulär schwer abbaubaren CSB dar. Roeleveld und Loosdrecht (2002) gehen davon aus, dass die gesamte Menge des biologisch abbaubaren CSB die Summe des  $S_s$  und  $X_s$  ist. In der Richtlinie von Roeleveld und Loosdrecht (2002) wird die ganze Menge des biologisch abbaubaren CSB aus dem sogenannten BSB-Test abgeschätzt. (WERF, 2003)

Ein BSB-Test wird am Rohabwasser des Zulaufs der ARA durchgeführt. Das Ergebnis dieses Tests stellt den biologischen Sauerstoffbedarf als Funktion der Zeit dar. Ein Beispiel des Tests ist in Abbildung 3-6 zu sehen, wobei zweifache BSB-Messungen

an den Tagen 1, 2, 4, 6 und 8 durchgeführt wurden. Die Konstante  $k_{BSB}$  (Abbildung 3-6) ermöglicht die Bestimmung von  $BSB_{tot}$  auf Basis der durchgeführten Messungen der BSB-Konzentration. In niederländischen Abwässern schwankt der Wert dieser Konstante zwischen 0,15 und 0,8 [-]. Der  $BSB_{tot}$ -Wert ist ein mittels Regression approximierter Wert des BSB. Die  $BSB_{tot}$ -Kurve ist eine Funktion des BSB über die Zeit. Diese Zeit hängt von der ausgewählten Messdauer des biologischen Sauerstoffbedarfs ab. Laut Roeleveld und Loosdrecht (2002) soll eine Messzeit zwischen 5 und 19 Tage gewählt werden, wobei die Dauer von 8 Tagen eine optimale Messdauer darstellt.



**Abbildung 3-6:** Anpassung der Kurve der  $BSB_8$ -Messung und Auswertung des  $BSB_{\infty}$  (Roeleveld & Loosdrecht, 2002)

Wenn die Konstante  $k_{BSB}$  mittels Regression bestimmt wird, kann die Konzentration der  $BSB_{tot}$  aus einem beliebigen  $BSB_t$  ( $BSB$  für  $t$  Tage) der  $BSB_8$ -Messung ermittelt werden.

Aus der Gleichung 3-5 geht hervor wie, der  $BSB_{tot}$  berechnet wird, wenn die Parameter  $k_{BSB}$  und  $BSB_t$  ( $BSB$  für  $t$  Tage) bekannt sind.

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} * t}} * BSB_t \quad \text{Gleichung 3-5}$$

mit:

$k_{BSB}$  ... Konstante erster Ordnung (-),  $BSB_t$  ... biochemischer Sauerstoffbedarf für  $t$ -Tage (mg/L),

$BSB_{tot}$ ... mittels Regression approximierter Wert aus der BSB-Messung (mg/L),  $t$  ... Tag der Messung (-)

Laut Roeleveld und Loosdrecht (2002) stellt der  $BSB^\infty$  den totalen biochemischen Sauerstoff dar, welcher zur Gänze von biologisch abbaubaren Fraktionen ( $S_s$  und  $X_s$ ) verbraucht wird. Um den  $BSB^\infty$  auf Basis von  $BSB_{tot}$  zu ermitteln, muss ein Korrekturfaktor ( $f_{BOD}$ ) eingeführt werden (Gleichung 3-6). Dieser ermöglicht es, den endogenen Rückstand der zerfallenen Biomasse zu berücksichtigen. Für diesen Faktor kann ein Wert zwischen 0,1 und 0,2 gewählt werden. Darüber hinaus kann der  $BSB^\infty$  durch die Gleichung 3-6, wenn der  $BSB_{tot}$  und Korrekturfaktor ( $f_{BOD}$ ) bekannt sind, berechnet werden.

$$BSB^\infty = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} \quad \text{Gleichung 3-6}$$

mit:

$BSB^\infty$  ... gesamter biologischer Sauerstoffbedarf (mg/L),  $f_{BOD}$  ... Korrekturfaktor (-),  $BSB_{tot}$ ... mittels Regression approximierter Wert aus der BSB-Messung (mg/L)

Aus der Gleichung 3-7 geht hervor, dass sich die  $X_s$ -Fraktion aus der Differenz des gesamten biochemischen Sauerstoffbedarfs ( $BSB^\infty$ ) und der leicht abbaubaren Fraktion ( $S_s$ ) ermitteln lässt.

$$X_s = BSB^\infty - S_s \quad \text{Gleichung 3-7}$$

mit:

$X_s$  ... schwer abbaubarer-CSB (mg/L),  $BSB^\infty$ ... gesamter biologischer Sauerstoffbedarf nach Roeleveld & Loosdrecht(2002) (mg/L),  $S_s$  ... gelöster, schnell abbaubarer-CSB

### 3.3. Bestimmung des gelöst inerten CSB ( $S_i$ )

Die gelöst inerte CSB-Fraktion ( $S_i$ ), welche biologisch nicht abgebaut werden kann, verlässt die ARA im Ablauf ohne signifikante Konzentrationsunterschiede zum Zulauf. Das heißt, dass diese Fraktion nicht vom biologischen Klärprozess beeinflusst wird. Hier handelt es sich nach Gujer und Henze (1991) um eine CSB-Fraktion, welche trotz zehntägiger Belüftung weiterhin im Reaktor vorhanden ist. Diese Annahme trifft jedoch nur unter folgenden Bedingungen zu:

- Die Menge des leicht abbaubaren CSB im Ablauf ist im Vergleich zu den inerten Stoffen vernachlässigbar. Die Konzentration des leicht abbaubaren CSB im Ablauf beträgt weniger als 2 mg/L.
- Es wird kein inert gelöster CSB im Klärprozess produziert.

Kläranlagen, die stark verschmutztes Abwasser behandeln ( $CSB > 1500$  mg/L), haben aufgrund dieser Fraktion Schwierigkeiten, die vorgeschriebenen Ablaufgrenzwerte einzuhalten. Zu den Bestandteilen dieser Fraktion zählen Huminstoffe, Tenside und Ligninsulfonsäuren. Der Anteil dieser Fraktion variiert zwischen 1 und 2 % im Rohabwas-

ser beziehungsweise zwischen 3 und 14,3 % nach der Sedimentation. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf 17 Studien aus unterschiedlichen Ländern und Regionen. (Pasztor et al., 2008)

### 3.3.1. Methode zur Bestimmung der Si-Fraktion

Die Erfassung des gelöst inerten CSB ist vergleichsweise einfach. Die Annahme, dass das Filtrat des Abwassers im Ablauf der ARA fast ausschließlich gelöst inerte Stoffe beinhaltet, ermöglicht eine relativ einfache Bestimmung dieser Fraktion. Abwasser wird demnach aus dem Ablauf der ARA mit einem 0,45 µm-Filter behandelt. Die CSB-Konzentration dieses Filtrats entspricht der Menge dieser Fraktion.

Im Gegensatz zu kommunalem Abwasser sind im industriellen Abwasser zumeist auch kolloidale Stoffe im Ablauf der ARA vorhanden. Aus diesem Grund ist es ratsam, die Abwasserprobe vor der Filtration zu fällen (ffCSB). Sollte die Probe nur kommunales Abwasser beinhalten, kann auf den Fällungsschritt verzichtet werden. Der Unterschied zwischen dem ffCSB und einem 0,45 µm-Membrane-Filtrat beträgt weniger als 5 mg/L. (WERF, 2003)

Die Richtlinie der STOWA Roeleveld & Loosdrecht (2002) bietet eine Alternative zum ffCSB. So kann die Separation des Si auch nur mithilfe eines 0,1 µm-Filters durchgeführt werden. Sie bietet auch einen Korrekturfaktor, welcher die gelöst abbaubaren Stoffe im Ablauf einer ARA berücksichtigt. Die gelöst inerte Fraktion des CSB lässt sich laut Roeleveld & Loosdrecht (2002) in Abhängigkeit vom Belastungsgrad der ARA folgendermaßen bestimmen:

- Si-Fraktion wird in gering belasteten ARAs laut Gleichung 3-8 anhand des Ablauffiltrats und unter Berücksichtigung der S<sub>s</sub>-Fraktion (10 %) errechnet.

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

mit:

$S_i$  ... gelöst inerter CSB (mg/L),  $CSB_{ABL,FILT}$  ... CSB Konzentration des Filtrats aus dem Ablauf der ARA (mg/L)

- Si-Fraktion kann in stark belasteten ARAs laut Gleichung 3-9 unter Berücksichtigung des BSB<sub>5</sub> und anhand des Ablauffiltrats errechnet werden.

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT} - BSB_{5,ABL} \quad \text{Gleichung 3-9}$$

mit:

$S_i$  ... gelöst inerter CSB (mg/L),  $CSB_{ABL,FILT}$  ... CSB Konzentration des Filtrats aus dem Ablauf der ARA (mg/L),  $BSB_{5,ABF}$  ... Konzentration des BSB<sub>5</sub> im Ablauf der ARA

### 3.4. Bestimmung des partikulär inerten CSB (X<sub>i</sub>)

Die partikuläre inerte CSB-Fraktion (X<sub>i</sub>) zählt auch zu den biologisch nicht abbaubaren Komponenten, welche durch Absetzung oder mit dem Überschussschlamm abge-

schieden werden können. Bezüglich der Dimensionierung hat diese Fraktion Auswirkungen auf die Produktion von Primär- und Sekundärschlamm. Aus diesem Grund ist  $X_i$  für den Prozess der Schlamm- und Schlammwässerung maßgeblich. Im Hinblick auf den Glühverlust ist diese Fraktion für die Beschreibung des Schlammkreislaufs wichtig. Das Abwasser im Zulauf zu einer kommunalen ARA enthält zwischen 8 und 39 % der partikulär inerten Stoffe und zwischen 4 und 20 % dieser Stoffe sind im Abwasser nach der Sedimentation weiterhin vorhanden. In einem stabilen System wird die Bilanz der Masse des  $X_i$ -Zulaufs über den Überschussschlamm und den Ablauf der ARA gebildet. In Bezug auf die Massenbilanz ist die Masse des  $X_i$  gleich dem Produkt aus der  $X_i$ -Zulaufmasse/Tag und Schlammalter. Da  $X_i$  zu den inerten Stoffen zählt, resultiert seine höhere Konzentration im Zulauf der ARA in einem höheren Verhältnis des CSB zum BSB (WERF, 2003 und Pasztor et al., 2008). Die dargestellten Ergebnisse basieren auf 17 Studien aus unterschiedlichen Ländern und Regionen.

#### **3.4.1. Simulations-Methode zur Bestimmung der $X_i$ -Fraktion**

Die Konzentration des  $X_i$  kann auf Basis von dynamischer Simulation mithilfe eines Belebtschlamm-Modells ASM und durch den Vergleich des geschätzten und des gemessenen Werts des Glühverlustes bestimmt werden. Die Anfangskonzentration des  $X_i$  wird laut WERF (2003) geschätzt und im Modell iteriert. Dieser Vorgang dauert solange bis die gemessenen Werte und Modellwerte des Glühverlustes übereinstimmen. Ein zusätzlicher Zusammenhang zwischen der Konzentration des  $X_i$  und anderen Prozessen, wie der Sauerstoffzehrung und der Nitrifikation, kann beim ASM als ein Gegenteil zur Bestimmung des  $X_i$  verwendet werden. Ein erhöhter  $X_i$  im Zulauf der ARA hat folgende Auswirkungen WERF (2003):

- Erhöhung der Menge des Glühverlustes aufgrund zusätzlicher Ansammlung.
- Verminderung der kohlenstoffartigen Sauerstoffzehrung, da die BSB-Konzentration sinkt.
- Erhöhung des Stickstoffgehalts, was die Sauerstoffzehrungsmenge der Nitrifikation verringert.

Der Vorteil der Vorgehensweise mithilfe eines Simulationsmodells besteht darin, dass die geschätzte Sauerstoffzehrung und das Nitrat aus dem Ablauf der ARA schnell mit den gemessenen Daten und dem Glühverlust verglichen werden können. Der Nachteil dieser Variante ist durch die Sauerstoffzehrungsdaten bedingt, die in einem vollmaßstäblichen System nicht verfügbar sind. (WERF, 2003)

Im Rahmen der Simulation ist es wichtig, das gleiche Modell für die Schätzung und die Simulation der  $X_i$  zu verwenden. Daher ist das Modell aus Gleichung 3-10 der „Water Research Commission“ für die Darstellungszwecke sehr nützlich. Mit der Annahme, dass der Glühverlust eine gleichmäßige Konzentration aufweist, kann er durch die Gleichung 3-10 geschätzt werden. (Water Research Commission aus WERF (2003))

$$X_{GV} = \frac{QCSB_{T,ZUL}\theta_x}{f_{cv}V} \left\{ \frac{(1 - f_{xi} - f_{si})Y_{HET}}{1 + b_H\theta_x} (1 + f b_H\theta_x) + f_{xi} \right\} \quad \text{Gleichung 3-10}$$

mit:

$X_{GV}$  ... Konzentration des Glühverlustes (mg/L),  $Q$  ... Zulaufmenge zur ARA (L/Tag),  $CSB_{T,ZUL}$  ... CSB Konzentration (Zulauf),  $\theta_x$  ... Schlammalter,  $V$  ... Volumen des Reaktors (L),  $Y_{HET}$  ... Ertragskoeffizient der heterotrophen Organismen (0,666 mg CSB/mg),  $b_H$  ... Zerfallsrate der Endogenen ( $0,24(1,029)^{T-20}$ /Tag),  $f$  ... Fraktion der gespeicherten Endogenen (0,2 GV mg / GR),  $f_{cv}$  ... CSB/GV Verhältnis (1,48 mg CSB/mg GV),  $f_{xi}$  ... Konzentration der partikulär inerten Stoffe (%),  $f_{si}$  ... Konzentration der gelöst inerten Stoffe (%)

Wichtigster Parameter der Schätzung des  $X_i$  anhand der oben genannten Methode ist das Schlammalter. Die Methode kann auch an einem vollmaßstäblichen System angewendet werden. Dennoch wird aufgrund genauerer Schlammalter-Daten, welche ein vollmaßstäbliches System nicht immer bietet, ein Laborversuch vorgezogen. (WERF, 2003)

### 3.4.2. STOWA-Methode zur Bestimmung der $X_i$ -Fraktion

Die Richtlinie der STOWA nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) bestimmt den  $X_i$  aus der Differenz des gesamten CSB und den restlichen CSB-Fractionen ( $S_s$ ,  $X_s$ ,  $S_i$ ). Das bedeutet, dass die restlichen Fractionen samt dem CSB des Zulaufs zuerst bestimmt werden müssen. Die Methode berücksichtigt dabei vier Fractionen des CSB:  $S_s$ ,  $X_s$ ,  $S_i$  sowie  $X_i$  (WERF, 2003). Der Nachteil dieser Methode besteht in dem Risiko, dass sämtliche anderer Messfehler und Ungenauigkeiten eine genaue Erfassung des  $X_i$  beeinträchtigen können. Gleichung 3-11 zeigt wie die  $X_i$ -Fraktion aus der Differenz des gesamten CSB und den restlichen Fractionen des CSB berechnet werden kann.

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - S_i - X_s \quad \text{Gleichung 3-11}$$

mit:

$CSB_{GES}$  ... gesamter chemischer Sauerstoffbedarf (mg/L),  $S_s$  ... gelöst schnell abbaubarer CSB (mg/L),  $X_s$  ... partikulär langsam abbaubarer CSB (mg/L),  $S_i$  ... gelöst inerten CSB (mg/L),  $X_i$  ... partikulär inerten CSB (mg/L)

### 3.4.3. Alternative Methoden zur groben Abschätzung der $X_i$ -Fraktion

Wenn ARA-Daten zur Erfassung des  $X_i$  mithilfe der oben erwähnten Methoden nicht verfügbar sind, können andere Parameter für diese Zwecke herangezogen werden. Obwohl diese alternativen Lösungen eher konservative Ergebnisse liefern können, geben sie erste Hinweise über die Größenordnung der gesuchten Fraktion. (WERF, 2003)

### 3.4.3.1. Verhältnis von CSB/BSB<sub>5</sub> zur groben Abschätzung der X<sub>i</sub>-Fraktion

Wenn die Daten des CSB und BSB<sub>5</sub> aus dem Zulauf der ARA verfügbar sind, kann das Verhältnis beider Werte ausgerechnet werden und als Indikation für die X<sub>i</sub>-Fraktion dienen.

- Rohes kommunales Abwasser = 2,0-2,2 mg CSB / mg BSB<sub>5</sub>
- Kommunales Abwasser nach der Sedimentation = 1,9-2,0 mg CSB / mg BSB<sub>5</sub>

Kommunales Abwasser, dessen Werte höher als im oberen Beispiel sind, deuten auf eine ungewöhnlich hohe Konzentration an X<sub>i</sub> hin. (WERF, 2003)

### 3.4.3.2. Verhältnis von Glühverlust/AFS zur groben Abschätzung der X<sub>i</sub>-Fraktion

Bei diesem Indikator handelt es sich um den Glühverlust GV (Engl.: Volatile Suspended Solids VSS) und der AFS-Konzentration der Probe aus dem Belebungsbecken. Vollmaßstäbliche Systeme ohne Phosphorelimination können auf diese Weise auf X<sub>i</sub> überprüft werden.

- Rohes kommunales Abwasser = 0,75 mg GV / mg AFS
- Kommunales Abwasser nach der Absetzung = 0,83 mg GV / mg AFS

Kommunales Abwasser, dessen Werte höher als im oberen Beispiel sind, deuten auf eine ungewöhnlich hohe Konzentration an X<sub>i</sub> hin. (WERF, 2003)

### 3.4.3.3. Höhe des Glühverlustes zur groben Abschätzung der X<sub>i</sub>-Fraktion

Im kommunalen Abwasser kann die X<sub>i</sub>-Fraktion indirekt über den Wert des Glühverlustes GV im Zulauf der ARA abgeschätzt werden (Spanne des GV üblicherweise von 20 bis 40 %). Diese Spanne kann auch als Gegenteil der Erfassung (gemessen/geschätzt) der X<sub>i</sub>-Fraktion verwendet werden. Tabelle 3-1 zeigt die Berechnung des GV anhand der Standardaufteilung der Fraktionen des Zulaufs sowie die Berechnung der X<sub>i</sub>-Fraktion. (WERF, 2003)

**Tabelle 3-1:** Beispiel der Berechnung der partikulär inerten Fraktion des GV (WERF, 2003)

Parameter	Konzentration (mg/L)	Fraktion	Einheit der Fraktion
Gesamt BSB	400		(mg CSB / mg gesamt CSB)
S <sub>i</sub>	20	0,05	(mg CSB / mg gesamt CSB)
S <sub>s</sub>	80	0,2	(mg CSB / mg gesamt CSB)
X <sub>s</sub>	248	0,62	(mg CSB / mg gesamt CSB)
Partikulärer X <sub>s</sub>	186	0,75	(mg CSB / mg gesamt CSB)
Kolloidaler X <sub>s</sub>	62	0,25	(mg CSB / X <sub>s</sub> -CSB)
X <sub>i</sub>	52	0,13	(mg CSB / X <sub>s</sub> -CSB)
GV	149		(mg CSB / mg gesamt CSB)

GV**	0,22
GV = (X <sub>s</sub> + X <sub>i</sub> ) / 1,6	
GV** = (X <sub>i</sub> / 1,6) / GV.....(partikulär inerte Anteil des Glühverlustes)	
<b>Anmerkung: Diese Berechnungen gehen von einem Verhältnis des CSB zum GV von 1,6 aus!</b>	

#### 3.4.3.4. Höhe des CSB, des BSB<sub>5</sub> und des Glühverlustes zur groben Abschätzung der X<sub>i</sub>-Fraktion

In manchen Fällen sind historische Daten einer ARA mit den Werten des CSB, BSB<sub>5</sub> und des GV vorhanden. Da es relativ einfach ist, die S<sub>s</sub> und S<sub>i</sub> zu ermitteln, kann die inert partikuläre Fraktion des CSB anhand der aufgezeichneten Daten abgeschätzt werden. Diese Vorgehensweise basiert optional auf der Annahme bzw. dem tatsächlichen CSB/GV-Verhältnis. Eine umfassendere Erklärung dieses iterativen Prozesses ist in WERF (2003) nachzulesen. Dieser Zugang berücksichtigt nicht das Vorhandensein der kolloidal-inerten Stoffe im Zulauf, was als Nachteil dieser Vorgehensweise angesehen werden kann. (WERF, 2003)

### 3.5. Bestimmung des Anteils an aktiver Biomasse am CSB (X<sub>B</sub>)

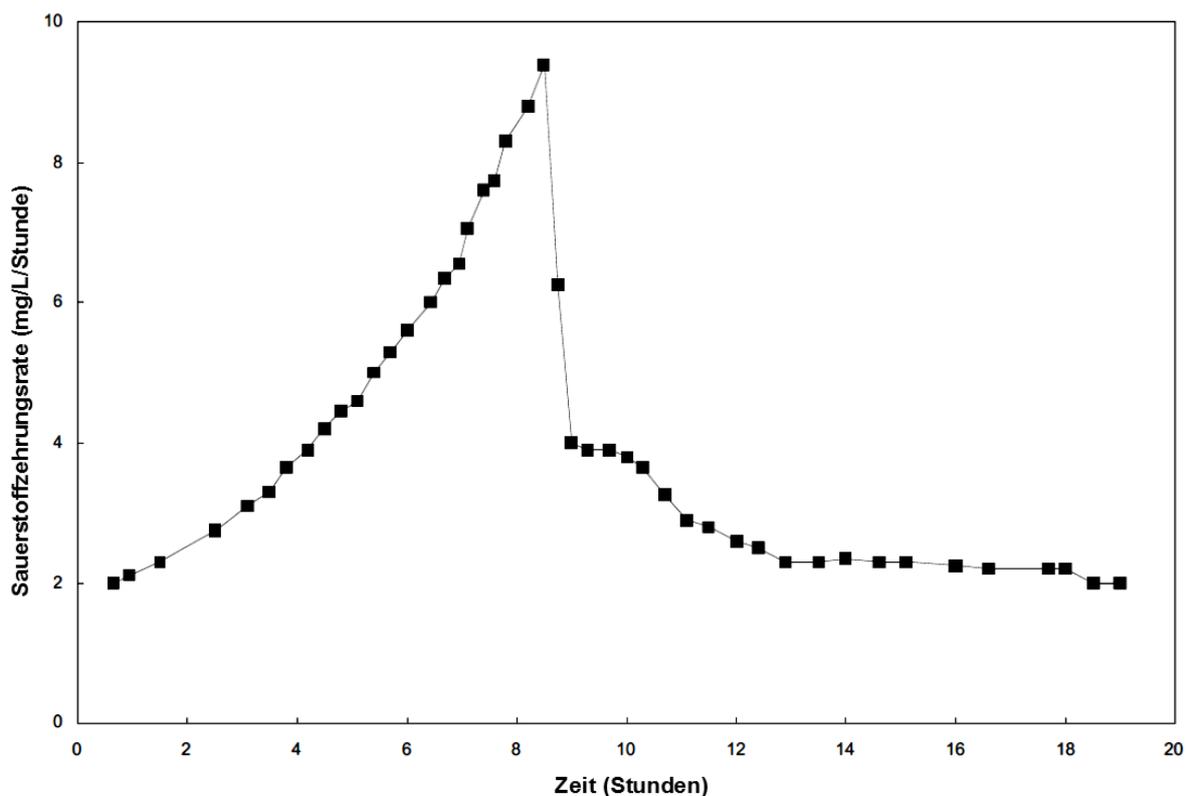
Der Anteil der aktiven Biomasse am CSB (X<sub>B</sub>) ist laut ASM2 und ASM2d in drei Untergruppen aufgeteilt: Die heterotrophe Biomasse (X<sub>H</sub>), die autotrophe Biomasse (X<sub>AUT</sub>) sowie Phosphor-akkumulierenden Bakterien (X<sub>PAO</sub>). Die CSB-Fractionen X<sub>AUT</sub> und X<sub>PAO</sub> werden grundsätzlich nicht gemessen, da ihr Anteil am Gesamt-CSB auf 1 % geschätzt wird. Diese Fraktionen müssen dennoch aufgrund ihrer niedrigen Wachstumsrate und ihres Risikos in stark belasteten Systemen abzusterben, mitberücksichtigt werden. Die heterotrophe Biomasse kann einen signifikanten Anteil des CSB ausmachen. Sie befindet sich im Bereich zwischen 7 und 20 % im Zulauf und liegt etwa zwischen 3,5 und 25 % des CSB nach der Sedimentation. (Roeleveld & Loosdrecht (2002), Orhon & Çokgör (1997)).

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Bestimmung dieser Fraktion nur in stark belasteten Systemen eine Rolle spielt (Roeleveld & Loosdrecht, 2002).

#### 3.5.1. Methode zur Bestimmung der X<sub>B</sub>-Fraktion

Die einzige hierfür vorgeschlagene Methode von WERF (2003) ist eine Labormethode, welche die Masse der heterotrophen Organismen erfasst. Dabei wird eine Belebtschlammprobe mit einer zentrifugierten Abwasserprobe vermischt. Von dieser Mischprobe wird die Sauerstoffzehrung gemessen und ein dementsprechendes Monitoring (bis zum signifikanten Abfall) der Werte durchgeführt. Eine Erweiterung dieser Methode wurde von Wentzel et. al. (1995) erarbeitet. Ihre fortgeschrittene Vorgehensweise ermöglicht die Erfassung aller aktiven Organismen einer Abwasserprobe aus dem Zulauf einer ARA.

In seinem Versuch wird ein bekanntes Volumen (3 - 4 Liter) des Abwassers, dessen CSB-Konzentration bekannt ist, gerührt und belüftet. Für die Dauer von 10 bis 20 Stunden wird die Sauerstoffzehrung des Versuchs diskontinuierlich gemessen. Ziel dieses Tests ist es, die Anfangskonzentration ( $X_{\text{HET},0}$ ) der heterotrophen Organismen im Zulauf der ARA zu bestätigen. Gleich am Anfang des Versuchs sollte die Probe eine bekannte Menge an  $S_s$  beinhalten. Darüber hinaus stellt immer die erste Phase des Versuchs eine logarithmische Wachstumsphase dar. Daher wächst die Sauerstoffzehrungsmenge exponentiell an, bis der  $S_s$  zur Gänze verbraucht ist (Abbildung 3-7). Sobald die  $S_s$ -Fraktion aufgezehrt ist, findet eine plötzliche Abnahme der Sauerstoffzehrung statt. Diese quantitative Reaktion der Sauerstoffzehrung kann für die Abschätzung der Organismenmasse verwendet werden. (Kappeler & Gujer, 1992 aus WERF, 2003)



**Abbildung 3-7:** Abschätzung des Anteils an aktiver Biomasse am CSB ( $X_B$ ) mithilfe der Methode der Sauerstoffzehrung (WERF, 2003, modifiziert)

Zu diesem Zweck wurde ein entsprechendes Modell eingeführt. (Wentzel et al., 1995) Das Modell (Gleichung 3-12) von Wentzel (1995) berücksichtigt die Sauerstoffzehrungsrate zur Zeit „t“ und die dazugehörige Anfangskonzentration der heterotrophen Organismen ( $X_{\text{HET},0}$ ). Gleichung 3-12 berücksichtigt auch die maximale spezifische Wachstumsrate der heterotrophen Organismen, Ertragskoeffizient (Biomasse/Menge des dafür verbrauchten Substrats) der heterotrophen Organismen und die Zerfallsrate der Mikroorganismen. Gleichung 3-13 errechnet die Steigung der logarithmisch dargestellten Sauerstoffzehrungsrate- $\ln(\text{OUR}_t)$  der Mikroorganismen.

$$\ln(OUR_t) = \ln \left[ \frac{\mu_{HET} * (1 - Y_{HET}) * X_{HET,0}}{24 * Y_{HET}} \right] + (\mu_{HET} - b_{HET}) * \frac{t}{24} \quad \text{Gleichung 3-12}$$

mit:

$OUR_t$  ... Sauerstoffzehrungsrate zur Zeit  $t$  (mg/L),  $\mu_{HET}$  ... maximale spezifische heterotrophe Wachstumsrate (-/d),  $Y_{HET}$  ... Ertragskoeffizient der heterotrophen Organismen (0,666 mg CSB / mg CSB),  $b_{HET}$  ... Zerfallsrate der heterotrophen Organismen ( $0,62 * (1,029)^{T-20}$  (-/d),  $X_{HET,0}$  ... Anfangskonzentration der heterotrophen Organismen (mg/L)

$$\text{slope} = (\mu_{HET} - b_{HET})/24 \quad \text{Gleichung 3-13}$$

mit:

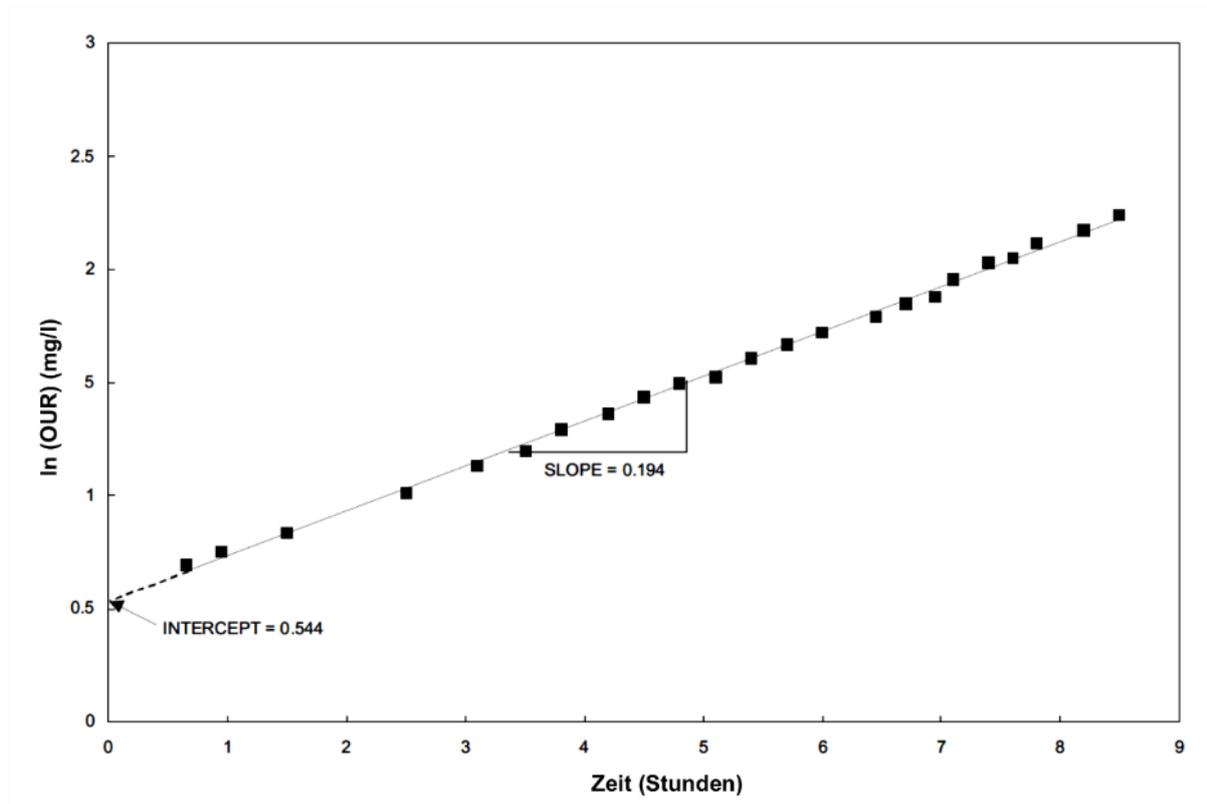
$\text{slope}$  ... Neigung (-),  $\mu_{HET}$  ... maximale spezifische heterotrophe Wachstumsrate (-/d),  $b_{HET}$  ... Zerfallsrate der heterotrophen Organismen ( $0,62 * (1,029)^{T-20}$  (-/d))

Der Plot (Abbildung 3-8) der logarithmisch dargestellten Sauerstoffzehrungsrate  $\ln(OUR_t)$  soll in diesem Fall eine Gerade ergeben, wobei die Gleichung 3-14 den Schnittpunkt mit der y-Achse der linearen Sauerstoffzehrungsrate errechnet. Gleichung 3-14 berücksichtigt auch die maximale spezifische Wachstumsrate der heterotrophen Organismen und den Ertragskoeffizient der heterotrophen Organismen.

$$y - \text{intercept} = \ln \left[ \frac{\mu_{HET} * (1 - Y_{HET}) * X_{HET,0}}{24 * Y_{HET}} \right] \quad \text{Gleichung 3-14}$$

mit:

$y$ -intercept ...  $\ln(OUR)$  (mg/L),  $\mu_{HET}$  ... maximale spezifische heterotrophe Wachstumsrate (-/d),  $Y_{HET}$  ... Ertragskoeffizient der heterotrophen Organismen (0,666mg CSB / mg CSB),  $X_{HET,0}$  ... Anfangskonzentration der heterotrophen Organismen (mg/L)



**Abbildung 3-8:** Plot eines Zeit-Sauerstoffzehrungs-Verhältnisses für die Anfangszeit des zunehmenden Sauerstoffverbrauchs (WERF, 2003)

Darüber hinaus lässt sich die Masse der heterotrophen Organismen mittels Gleichung 3-15 bestimmen, wobei der Schnittpunkt der linearen Sauerstoffzehrungsrate, Zerfallsrate der Organismen und der Ertragskoeffizient der heterotrophen Organismen berücksichtigt werden.

$$X_{HET,0} = \frac{e^{(y-intercept) * 24}}{(slope * 24 + b_{HET}) * (1 - Y_{HET}) / Y_{HET}} \quad \text{Gleichung 3-15}$$

mit:

*y-intercept* ... *ln(OUR)* (mg/L), *b<sub>HET</sub>* ... Zerfallsrate der heterotrophen Organismen ( $0,62 * (1,029)^{T-20}$  (-/d), *Y<sub>HET</sub>* ... Ertragskoeffizient der heterotrophen Organismen (0,666mg CSB/mg CSB), *X<sub>HET,0</sub>* ... Anfangskonzentration der heterotrophen Organismen (mg/L)

Wichtig zu erwähnen ist, dass diese Methode zu einer Reihe der Sauerstoffzehrungsmethoden zählt. Als solche kann sie neben der Erfassung der Biomasse zugleich auch als Erfassungsmethode der *S<sub>s</sub>*-Fraktion verwendet werden.

## 4. Auswahl der Fraktionierungsmethoden für den CSB

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 3 beschriebenen Fraktionierungsmethoden zunächst diskutiert. Anschließend soll näher auf die Vor- und Nachteile der jeweiligen Bestimmungsmethoden eingegangen werden, um jene Methoden identifizieren zu können, die zeit- und kosteneffizient durchgeführt werden können, konsistente Ergebnisse erwarten lassen und an die analytischen Möglichkeiten im Labor des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz angepasst sind.

### 4.1. Auswahl der Methode zur Bestimmung der $S_s$ -Fraktion

Die in der Literatur beschriebenen Methoden zur Bestimmung des  $S_s$  ermöglichen eine relativ genaue Erfassung dieser Fraktion. Grundsätzlich können die Versuche in zwei Kategorien (Sauerstoffzehrung und chemisch-physikalische Abtrennung) unterteilt werden. Eine detaillierte Beschreibung der möglichen Bestimmungsmethoden ist in Kapitel 3.1 zu finden.

Wie bereits erwähnt, können die  $S_s$ -Fraktionen mit den Sauerstoffzehrungsmethoden relativ genau bestimmt werden. Nachteilig an Ihnen ist allerdings, dass sie eine spezifische Infrastruktur (SBR-Reaktor, Messequipment zur Messung der Sauerstoffzehrung, kontrollierte Sauerstoffzugabe) benötigen und auch recht zeitaufwendig sind.

Eine weitere in Frage kommende Methode ist jene, die sich der Bestimmung der Sauerstoffzehrungsrate bedient. Diese Methode basiert auf der Schätzung der Eingangswerte zu Beginn der Messung. Da dabei allerdings bislang ausschließlich auf Literaturwerte in Bezug auf die CSB-Fraktionierung zurückgegriffen werden kann, wird diese Methode in dieser Masterarbeit auch nicht berücksichtigt.

Im Gegensatz dazu sind die chemisch-physikalische Lösungsansätze in Bezug auf die Einfachheit ihrer Anwendung und deren erforderliche Laborvoraussetzungen vielversprechender. Daher wurde die chemisch-physikalische Methode als Bestimmungsmethode zur Bestimmung der  $S_s$ -Fraktionen im Rahmen dieser Masterarbeit auch ausgewählt. Die physikalische Trennung der Fraktionen benötigt auch vergleichsweise wenig Zeit. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass die  $S_i$ -Fraktion gleichzeitig mit dem  $S_s$  erfasst wird. Die oben erwähnte physikalische Trennung der Fraktionen erfolgt mittels Filtration. Da eine Filtration mit einer Filterporenweite von  $0,45\ \mu\text{m}$  dafür nicht ausreichend ist, wird nach Mamais et al. (1993, aus WERF (2003)) ein Fällungsschritt empfohlen. Die Möglichkeit damit allerdings auch die gelösten Stoffe, welche die Genauigkeit der Messung beeinflussen können, zu entfernen, spricht jedoch gegen die Einführung eines Fällungsschrittes. Die STOWA Richtlinie nach Roleveld & Loosdrecht (2002) empfiehlt daher einen Verzicht dieses Fällungsschrittes und empfiehlt stattdessen die Verwendung eines  $0,1\ \mu\text{m}$ -Filters.

#### **4.2. Auswahl der Methode zur Bestimmung der $X_s$ -Fraktion**

Die vorhandene Literatur beschreibt zwei Methoden zur  $X_s$ -Bestimmung. Eine davon ist eine Erweiterung der Methode mittels Sauerstoffzehrung, weswegen sie aus den in Abschnitt 4.1 genannten Gründen nicht als Methode für diese Masterarbeit verwendet wurde. Eine genauere Beschreibung dieser Methode ist in Kapitel 3.2.1 zu finden.

Auch dafür bietet sich als Alternative die Methode der STOWA (Kapitel 3.2.2) nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) an. Aufgrund der eingeschränkten Labormöglichkeiten wurde allerdings die Vorgehensweise etwas modifiziert. So wurde die zweifache Messung des  $BSB_8$  durch eine dreifache  $BSB_5$ -Messung ersetzt. Alle restlichen Schritte wurden von der STOWA-Methode nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) übernommen. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde also die STOWA-Methode auch als Bestimmungsmethode für die  $X_s$ -Fraktion ausgewählt.

#### **4.3. Auswahl der Methode zur Bestimmung der $S_i$ -Fraktion**

Zur Bestimmung der  $S_i$ -Fraktion wurde die in Kapitel 3.3 beschriebene Vorgehensweise angewendet. Der Annahme folgend, dass das Filtrat des Ablaufs der ARA nur gelöste Stoffe beinhaltet, kann eine rein physikalische Trennung (Filtration) dieser Fraktion aus dem Abwasser durchgeführt werden. Zur Berücksichtigung der leicht abbaubaren Stoffe des Filtrats wird ein Korrekturfaktor (0,9 [-]) eingeführt. Da die Bestimmung des  $S_i$  einen Teil der  $S_s$ -Bestimmung darstellt, wurde auch hierfür ein 0,1  $\mu\text{m}$ -Filter verwendet.

#### **4.4. Auswahl der Methode zur Bestimmung der $X_i$ -Fraktion**

Die von der WERF (2003) empfohlene Methode (Kapitel 3.4.1) beschreibt die Nachahmung eines biologischen Systems, welches gleichzeitig mit einem dynamischen Simulationsmodell durchgeführt und verglichen werden sollte. Die labortechnische Ausrüstung für die Durchführung eines solchen Versuchs ist jedoch sehr umfangreich, weshalb diese Methode für diese Masterarbeit nicht in Betracht gezogen wurde.

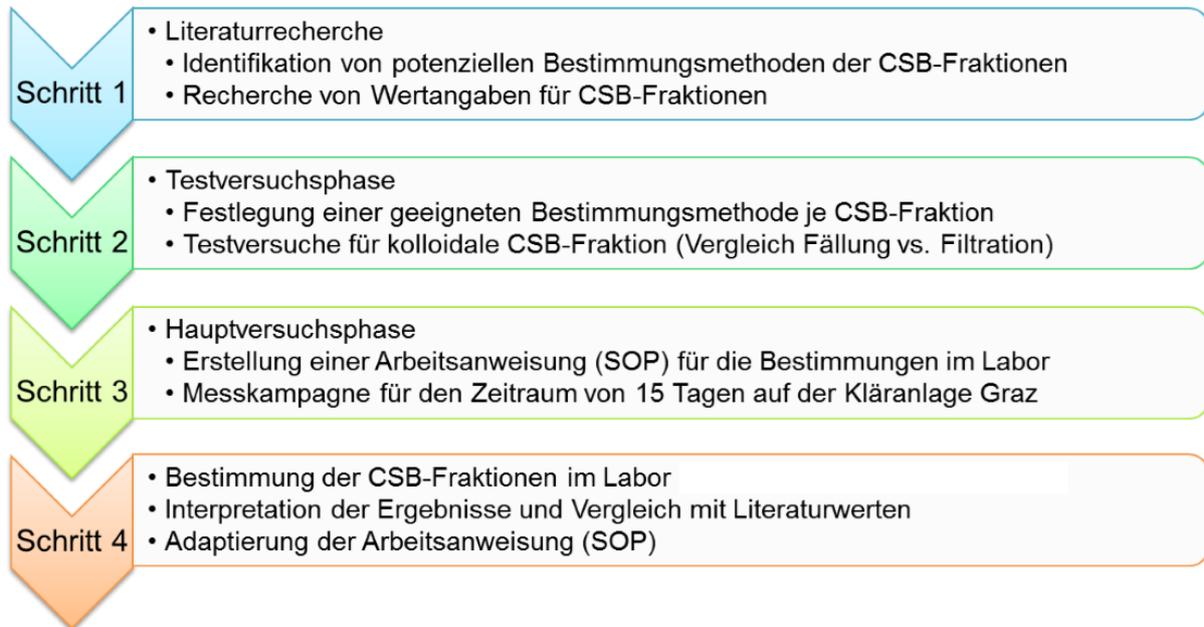
Die restlichen von WERF (2003) vorgeschlagenen Lösungsansätze (Kapitel 3.4.3) basieren auf groben Abschätzungen von Verhältnissen und Größen anderer Parameter ( $CSB/BSB_5$ ,  $GV/AFS$  usw.). Diese Lösungsansätze dienen eher der Kontrolle als der Bestimmung dieser Werte, da mit ihrer Hilfe nur die Plausibilität der Ergebnisse überprüft werden kann.

Da die oben genannten Methoden die vorgegebenen Auswahlkriterien nicht erfüllten, wurde beschlossen, die Konzentration des  $X_i$  anhand der Differenz des Gesamt-CSB und der restlichen, zuvor bestimmten Fraktionen zu ermitteln. Diese in Kapitel 3.4.2 beschriebene Vorgehensweise wurde auch in der STOWA-Methode nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) auf Kommunalabwässer angewendet und konnte dort befriedigende Ergebnisse liefern. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass sich sämtliche

Mess- und Prozessfehler bei der Bestimmung der anderen CSB-Fraktionen auch auf die Genauigkeit des  $X_i$  auswirken.

## 5. Methodik

In diesem Kapitel werden die einzelnen Ablaufschritte der Masterarbeit zusammengefasst und beschrieben. Aus der Abbildung 5-1 ist ersichtlich, dass die Masterarbeit in vier wesentlichen Schritte aufgeteilt ist: Literaturrecherche, Testversuchsphase, Hauptversuchsphase und Laboranalysen.



**Abbildung 5-1:** Ablaufschritte der Masterarbeit

### 5.1. Beschreibung der Testversuchsphase

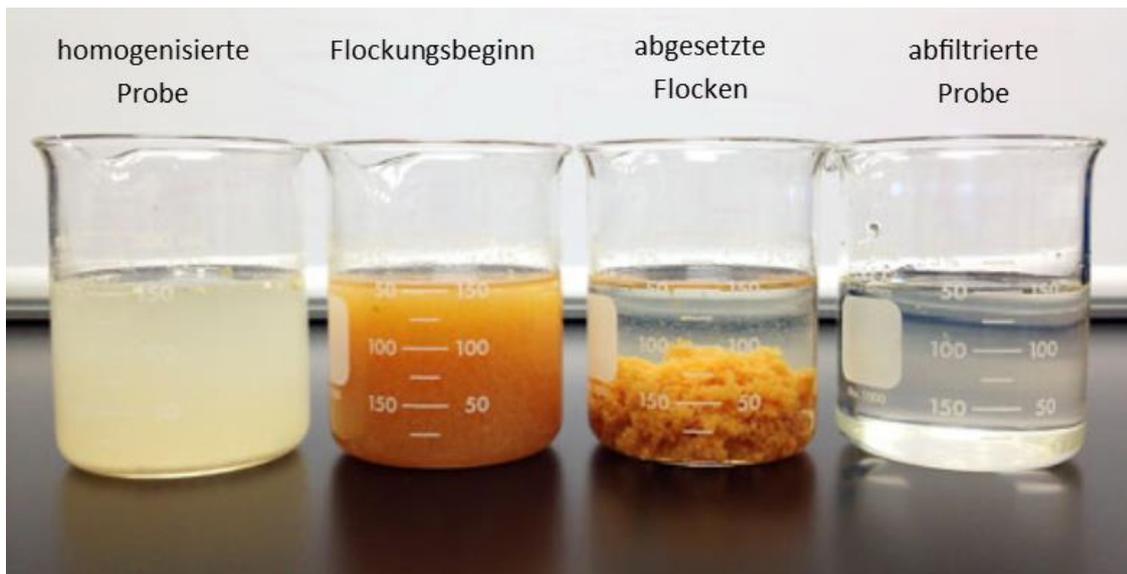
Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden Testversuche mit Fällungsmitteln zur Identifikation der kolloidalen CSB-Fraktion durchgeführt. Da die Entfernung kolloidaler Stoffe für das Thema der CSB-Fraktionierung wichtig ist, war eines der Ziele dieses Versuchs der Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung kolloidaler Stoffe aus dem Abwasser. Mithilfe dieser Testversuche erfolgte schließlich auch die Wahl der Bestimmungsmethode für die kolloidalen Stoffe.

Der Fällungsvorgang mit  $\text{ZnSO}_4$  wurde nach WERF (2003) und jener mit  $\text{FeCl}_3$  nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) durchgeführt. Da eine genaue Beschreibung der erwähnten Vorgangsweise in den oben genannten Richtlinien nicht vorhanden ist, wurden die fehlenden Informationen mit den Erfahrungswerten des Laborpersonals kompensiert (Wartezeiten und Mischvorgang).

Die theoretischen Ansätze, die sich mit dem Mischvorgang auseinandersetzen, sind äußerst komplex. Die genaue theoretische Beschreibung der Lösungsansätze zum Thema Mischvorgang kann aus Wang et al. (2005) entnommen werden.

Beim Mischvorgang soll das Fällungsmittel gleichmäßig und schnell eingebracht werden. Nach einer anfänglichen schnellen Rührphase sollte langsam weitergerührt werden. Auf diese Weise werden die Kolloide bereits ausreichend destabilisiert und sind in der Lage, größere Flocken zu bilden. Ein Vorteil, den dieser Vorgang mit sich bringt, ist, dass sich die Flocken schnell absetzen können. (Wang et al., 2005)

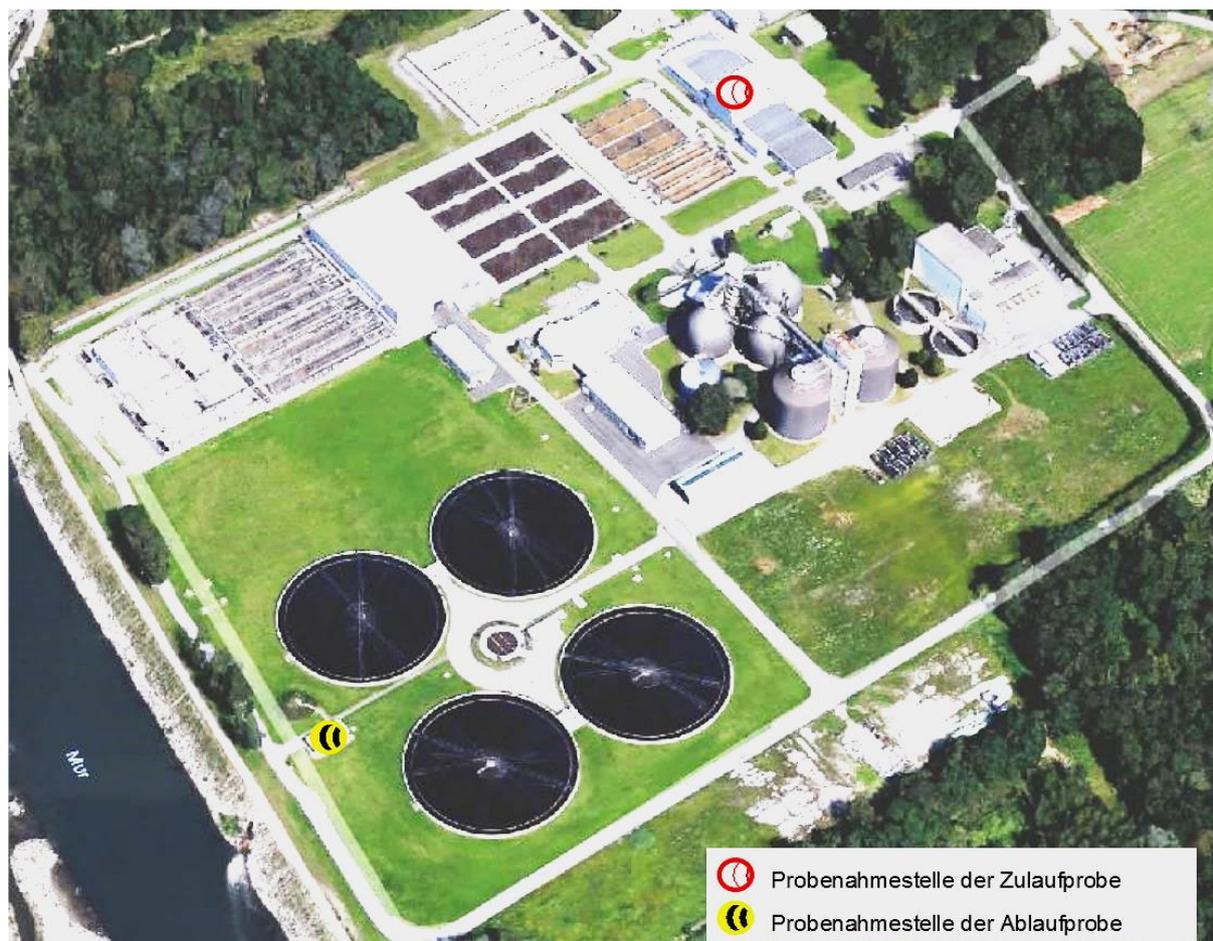
Von links nach rechts zeigt Abbildung 5-2 die verschiedenen Phasen der Flockenbildung in einer behandelten Abwasserprobe.



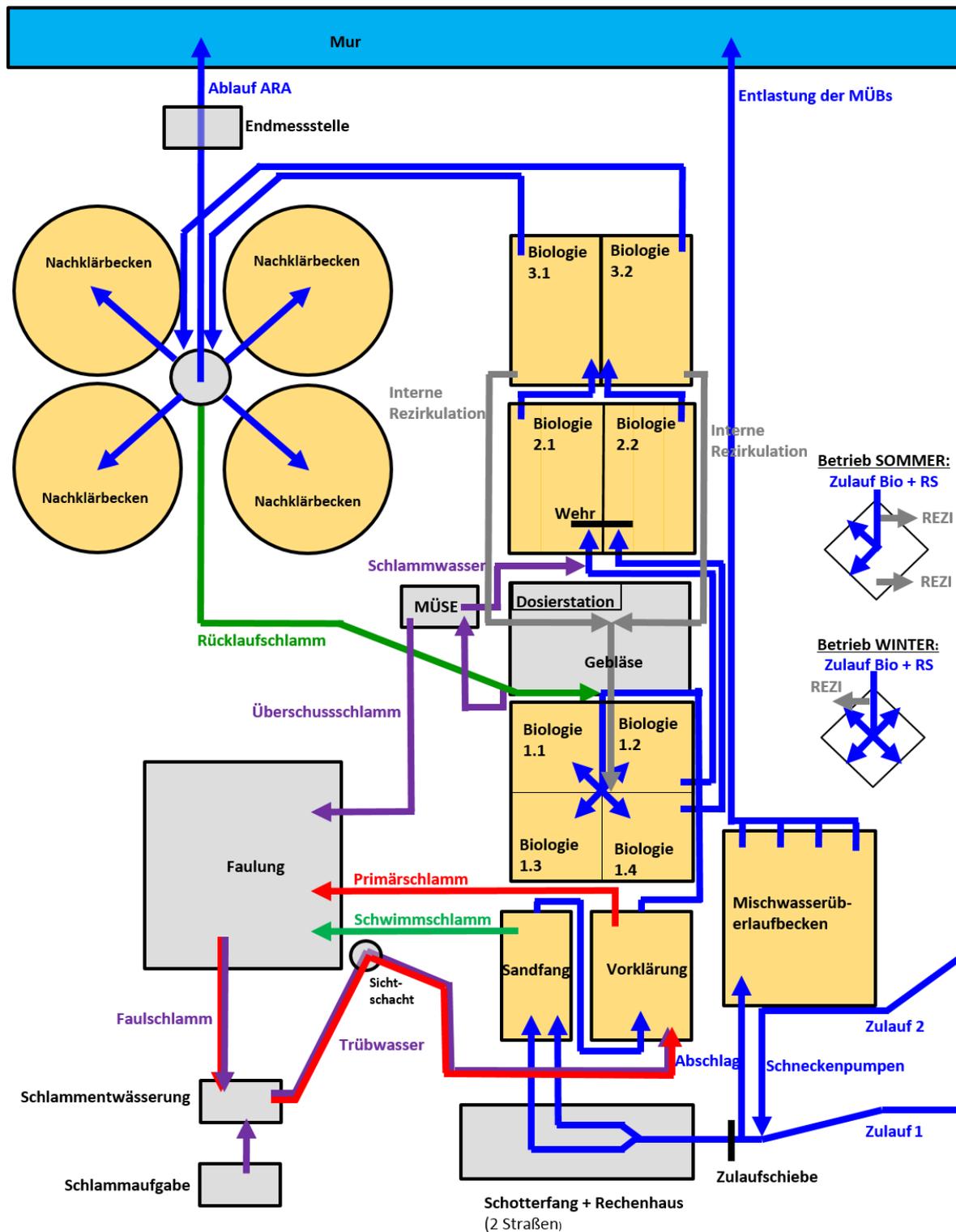
**Abbildung 5-2:** Phasen der Flockenbildung in einer Abwasserprobe (<http://zist-negar.com/purpose-of-wastewater-analysis>, letzter Zugriff: 2016-09-06)

## 5.2. Beschreibung der Messkampagne zur CSB-Fraktionierung

Zur praktischen Bestimmung der CSB-Fraktionen wurde im Rahmen dieser Masterarbeit eine 15-tägige Messkampagne zur Gewinnung von Abwasserproben aus dem Zulauf und Ablauf der ARA Graz-Gössendorf durchgeführt. Ein Orthofoto als Überblick über die ARA ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Abbildung 5-3 zeigt die Positionen der beiden Probenahmestellen während der Messkampagne. Eine schematische Übersicht der wichtigsten Anlagenteile ist in Abbildung 5-4 ersichtlich. Das 825 km lange Grazer Kanalnetz führt der ARA jährlich rund 27 Millionen Kubikmeter Niederschlagswasser und Schmutzwasser zu. Das Abwasser wird in der ARA mechanisch, biologisch und chemisch behandelt. Es handelt sich dabei um eine biologische ARA nach dem einstufigen Belebtschlammverfahren. (Haslauer, 2014)



**Abbildung 5-3:** Luftbild der ARA Graz (maps.google.at, letzter Zugriff: 2016-07-31)



**Abbildung 5-4:** Übersicht über die einzelnen Anlagenteile der Abwasserreinigungsanlage Graz-Gössendorf (Hofer et al., 2015)

### 5.2.1. Anlagenteile der ARA Graz-Gössendorf

Die Grazer Kläranlage besteht aus den folgenden Anlagenteilen (Haslauer, 2014):

- 4 Mischwasserüberlaufbecken (4 x 3.000 m<sup>2</sup>)
- 2 Grobstofffänge
- Rechenanlage inkl. Rechengutwäsche und Rechengutenwässerung
  - 2 Umlaufrechen (6 mm Spaltweite)
  - 1 Korbrechen (12 mm Spaltweite)
- 3 x belüfteter Sand- und Fettfang inkl. Sandwäscher (3 x 430 m<sup>3</sup>)
- Zulaufmengenmessung durch 3 parallel betriebene MID-Messungen (DN 1000)
- 4 rechteckige Vorklärbecken mit Schildräumer (4 x 690 m<sup>3</sup>)
- 6 Abwasserhebeanlagen (trocken aufgestellte Propellerpumpen)
- 3 Belebungsstufen (gesamt 52.700 m<sup>3</sup>)
- 4 runde Nachklärbecken mit Schild- und Schwimmschlammräumern und getauchtem Klarwasserabzug (4 x 10.000 m<sup>3</sup>)
- Phosphatfällungsstation für Flüssigfällungsmittel
- Möglichkeit der automatischen Probenahme im Zulauf zur ARA, im Zulauf zur biologischen Reinigung und im Ablauf der ARA
- Anaerobe, mesophile Schlammstabilisierung und Schlammentwässerung
- Betriebsgebäude mit Schaltwarte, Labor und Werkstatt

### 5.2.2. Technische Daten der ARA Graz-Gössendorf

Technische Daten ARA Graz-Gössendorf (Haslauer, 2014):

- Ausbaugröße: 500.000 EW (entspricht Größenklasse IV gemäß 1. AEVKA)
- Hydraulische Belastung:
  - Trockenwetter:  $Q_{TW,max} = 1,6 \text{ m}^3/\text{s}$  ;  $Q_{d,TW,max} = 90.000 \text{ m}^3/\text{d}$
  - Regenwetter:  $Q_{ARA} = Q_{MW,max} = 3,2 \text{ m}^3/\text{s}$  ;  $Q_{d,MW,max} = 276.480 \text{ m}^3/\text{d}$
- Maximale Zulauffrachten gemäß wasserrechtlichem Bewilligungsbescheid:
  - $BSB_5 = 30.000 \text{ kg/d}$
  - $CSB = 35.000 \text{ kg/d}$
  - $TKN = 4.750 \text{ kg/d}$
  - $P_{ges} = 750 \text{ kg/d}$

### 5.3. Beschreibung des Versuchsablaufs der Hauptversuchsphase

In diesem Kapitel werden alle ausgewählten Teilschritte zur CSB-Fraktionierung dargestellt und beschrieben. Dieses Kapitel fasst die im Anhang A im Detail beschriebene Arbeitsanweisung (SOP) zusammen.

Die Analysen wurden jeweils bereits ca. eine Stunde nach dem Ende der Probenahme (Zeitraum der Probenahme: 24 h, von 7:15 bis 7:15) durchgeführt, um den ungewollten Abbau der jeweiligen Fraktionen möglichst gering zu halten. Art der Probenahme: Diskontinuierliche, volumenproportionale 24 h-Probenahme, wobei jeweils ein konstantes Teilprobenvolumen nach einem konstanten Abflussvolumen periodisch entnommen wurde (Parametrierung des automatischen Probenahmesystems: 70 mL/550 m<sup>3</sup>). Dabei wurde besonders auf die Konservierung der Proben geachtet. Eine gute Konservierung bedeutet die Verwendung von luftdichten Probengefäßen, welche die chemische Zusammensetzung des Abwassers nicht beeinflussen können. Die Aufbewahrung und der Probentransport in das Labor des Institutes erfolgte in einer Kühlbox bei 4 °C. Das benötigte Probevolumen betrug jeweils 2 L pro Zulauf- bzw. Ablaufprobe. Um mögliche Abweichungen und Analyseunsicherheiten feststellen und interpretieren zu können, wurden alle analytischen CSB-Bestimmungen im Labor jeweils dreifach durchgeführt. Die manometrisch durchgeführten BSB<sub>5</sub>-Messungen wurden im Rahmen dieser Masterarbeit ebenfalls als Dreifachbestimmungen durchgeführt. konnten allerdings aufgrund der beschränkten Stellplätze in den BSB-Inkubationsschränken nur zweifach bestimmt werden. Aufgrund der besseren Anpassung der BSB-Kurve an die Regression wurde im Rahmen dieser Methodik eine dreifache BSB<sub>5</sub>-Messung durchgeführt. Dabei sind die Messungen der BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen die zeitlich aufwendigsten Messungen. Sie ist somit für die Gesamtdauer der Fraktionsbestimmung maßgebend. Vereinfacht wurde ein Zeitversatz von 24 Stunden bei der Probenahme zwischen Zulauf und Ablauf angenommen, um die hydraulische Aufenthaltszeit in der ARA näherungsweise zu berücksichtigen. Um einen besseren Überblick über die Vorgehensweise beim Versuchsablauf geben zu können, wurde dieser in fünf Schritte aufgeteilt:

#### **SCHRITT 1 (Anhang A, Kapitel 4.3 und Kapitel 4.7)**

Die gewonnene Probe (2 L) aus dem Zulauf der ARA wird homogenisiert und danach sofort seine CSB-Konzentration gemessen. Das Ergebnis dieser Messung gibt die Gesamtmenge der CSB-Konzentration (CSB<sub>GES</sub>) des Rohabwassers der ARA Graz-Gösendorf an.

#### **SCHRITT 2 (Anhang A, Kapitel 4.4 und Kapitel 4.10)**

Die Bestimmung der BSB<sub>5</sub>-Konzentration in der homogenisierten Zulaufprobe wurde nach der manometrischen Methode mit einem OxiTop IS 12-Set der Fa. WTW durchgeführt. Für eine durchgeführte Dreifach-Bestimmung sind dafür bei den Zulaufproben

zur ARA Graz-Gössendorf ca. 300 mL Zulaufprobenvolumen erforderlich. Diese Methode basiert auf manometrischen Druckmessungen in einem geschlossenen System und wurde von der Firma „WTW“ entwickelt. Diese Methode ermöglicht auch eine automatische stündliche Aufzeichnung der BSB-Daten. Die stündlich gemessenen Daten der dreifachen BSB<sub>5</sub>-Messung wurden nach den 5 Tagen ausgelesen, dokumentiert und für die Bestimmung des BSB<sub>∞</sub> verwendet. Aus den Ergebnissen der dreifachen BSB<sub>5</sub>-Messungen wurden der Maximal- und der Minimalwert ermittelt. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine leichtere Anpassung der BSB<sub>tot</sub>-Kurve bei der Regression nach Roeleveld & Loosdrecht (2002).

### **SCHRITT 3 (Anhang A, Kapitel 4.8)**

Die gewonnene Probe (2 L) aus dem Ablauf der ARA wird ebenfalls homogenisiert. Danach wird die homogenisierte Ablaufprobe aus dem Ablauf der ARA zunächst mit einem 0,45 µm-Filter (Cellulose Nitrat Filter) filtriert. Das 0,45 µm-Filtrat wird anschließend noch einmal durch einen 0,1 µm-Filter (Cellulose Nitrat Filter) filtriert. Dieser zweistufige Filtrationsvorgang musste eingeführt werden, um die ständige Filterverstopfung des 0,1 µm-Filters zu verhindern. Um eine dreifache Messung der S<sub>i</sub>-Fraktion gewährleisten zu können, wird ein Probenvolumen von mindestens 300 mL benötigt. Die nachfolgende CSB-Messung des 0,1 µm-Filtrats des Ablaufabwassers der ARA ergibt die Menge der gelöst inerten Stoffe (S<sub>i</sub>). Diese Fraktion (S<sub>i</sub>) wird von den biologischen Prozessen der ARA nicht beeinflusst und sollte nach dem ASM-Model in der gleichen Menge im Ab- und Zulauf der ARA vorhanden sein. In Anlehnung an die STOWA-Methode nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) wurde ein Korrekturfaktor von 0,9 eingeführt (Gleichung 5-1), um das Vorhandensein der schnell abbaubaren Stoffe S<sub>s</sub> im Filtrat zu berücksichtigen.

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1}$$

**Gleichung 5-1**

mit:

*S<sub>i</sub> ... gelöst inerte CSB (mg/L), CSB<sub>ABL,FILT,0.1</sub> ... CSB Konzentration des 0,1 µm-Filtrats aus dem Abfluss der ARA (mg/L)*

### **SCHRITT 4 (Anhang A, Kapitel 4.9)**

Um die gelösten Fraktionen (S<sub>s</sub> und S<sub>i</sub>) des Abwassers zu isolieren, wird ebenfalls auf eine Methode mit Filtration zurückgegriffen. Die homogenisierte Zulaufprobe der ARA wird ebenfalls mit dem 0,45 µm-Filter (Cellulose Nitrat Filter) vorfiltriert und erst anschließend mit einem 0,1 µm-Filter (Cellulose Nitrat Filter) weiterbehandelt (Grund siehe Schritt 3). Um eine dreifache Messung der S<sub>s</sub>-Fraktion gewährleisten zu können, wird ein Probenvolumen von mindestens 300 mL benötigt. Die CSB-Bestimmung dieses Filtrats ergibt die Menge der gelösten Fraktion beziehungsweise die Summe der gelöst inerten und schnell-abbaubaren Stoffe. Nach der Gleichung 5-2 wird aus der Differenz der CSB-Konzentration des Filtrats und der in SCHRITT 3 ermittelten S<sub>i</sub>-Konzentration die Konzentration der S<sub>s</sub>-Fraktion errechnet.

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i$$

**Gleichung 5-2**

mit:

$S_i$  ... gelöst inerte CSB (mg/L),  $CSB_{ZUL,FILT,0.1}$  ... CSB Konzentration des 0,1  $\mu$ m-Filtrats aus dem Zulauf der ARA (mg/L),  $S_s$  ... schnell abbaubarer CSB

**SCHRITT 5 (Anhang A Kapitel 4.10)**

Dieser Schritt zur Erfassung der  $X_s$ -Fraktion stellt ein modifiziertes Verfahren nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) zur Bestimmung der partikulär schwer abbaubaren Fraktion dar, wobei bei Anwendung dieser Methode davon ausgegangen wird, dass auch der  $X_H$ -Anteil (heterotrophe Biomasse) miterfasst wird (siehe Kapitel 2.3.2). Kapitel 3.2.2 beschreibt die genaue Vorgehensweise bei dieser Methode. Die Modifikation, die im Rahmen dieser Masterarbeit eingeführt werden musste, besteht darin, dass die eigentlich erforderlichen zweimaligen  $BSB_8$ -Messung durch  $BSB_5$ -Messungen ersetzt werden mussten, da das verwendete WTW-Messsystem die  $BSB$ -Werte nur 5 Tage lang aufzeichnen konnte. Mit der Regression der  $BSB_5$ -Ergebnisse wird der  $BSB_{tot}$  beziehungsweise der  $BSB^\infty$  in der Folge errechnet. Die Annahme, dass der  $BSB^\infty$  für den biologischen Abbau vollständig verbraucht wird, ermöglicht die weitere Bestimmung der  $X_s$ -Fraktion laut Gleichung 5-3.

$$X_s = BSB^\infty - S_s$$

**Gleichung 5-3**

mit:

$X_s$  ... partikulär schwer abbaubarer CSB (mg/L),  $BSB^\infty$  ... gesamter biologischer Sauerstoffbedarf nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) (mg/L),  $S_s$  ... schnell abbaubarer CSB

**SCHRITT 6 (Anhang A Kapitel 4.11)**

Da die  $X_i$ -Fraktion als einzige Unbekannte bleibt, lässt sie sich leicht aus der Differenz der restlichen Fraktionen vom  $CSB_{GES}$  errechnen. Wie bereits erwähnt, wirken sich dadurch allerdings etwaige Mess- und Prozessfehler bei der Bestimmung der anderen CSB-Fraktionen direkt auf den  $X_s$  aus. Der partikulär inerte CSB  $X_i$  wird somit nach der Gleichung 5-4 ermittelt.

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i$$

**Gleichung 5-4**

mit:

$X_i$  ... partikulär inerte CSB (mg/L),  $CSB_{GES}$  ... gesamter chemischer Sauerstoffbedarf,  $S_s$  ... schnell abbaubarer CSB,  $S_i$  ... gelöst inerte CSB (mg/L),  $X_s$  ... partikulär schwer abbaubarer CSB (mg/L)

## 6. Ergebnisse und Diskussion

Die Datenerhebung für die Laboranalysen fand im Rahmen einer fünfzehntägigen Messkampagne (26.06.2016 – 10.07.2016) auf der ARA Graz-Gössendorf statt, wobei der Beginn der Analysen bereits ca. eine Stunde nach dem Ende der 24-stündigen Probenahme stattfand. Dabei wurden jeweils Tagesmischproben im Zulauf und Ablauf der ARA entnommen. Der Zeitraum der Probenahme betrug jeweils 24 h von 07:15 bis 07:15. Die Art der Probenahme war eine auf der ARA standardmäßig eingestellte diskontinuierliche, volumenproportionale Probenahme, wobei ein konstantes Teilprobenvolumen nach einem konstanten Abflussvolumen periodisch entnommen wurde (Parametrierung des automatischen Probenahmesystems: 70 mL/550m<sup>3</sup>). Die Lage der beiden Probenahmestellen der ARA Graz-Gössendorf sind in der Abbildung 5-3 eingetragen. Um die hydraulische Aufenthaltszeit in der ARA näherungsweise zu berücksichtigen, wurde ein Zeitversatz von 24 Stunden bei der Probenahme zwischen Zulauf und Ablauf angenommen. Aus organisatorischen Gründen war es nicht möglich, eine reale Verweilzeit von 19 Stunden zu berücksichtigen (Hofer et al., 2015), weswegen im Rahmen dieser Masterarbeit eine Verweilzeit von 24 Stunden angenommen werden musste. Sämtliche Proben wurden jeweils dreimal ausgewertet, um mögliche Abweichungen und Unsicherheiten feststellen bzw. abschätzen zu können. Die Messung der BSB<sub>5</sub>-Konzentration war dabei die zeitlich aufwendigste Messung und war somit für die Gesamtdauer des Analyseprozesses maßgebend.

Messdatenbereiche über die verschiedenen CSB-Fraktionen, die in der einschlägigen Literatur vorhanden sind, wurden in Tabelle 6-1 zusammengefasst. Es handelt sich dabei um Ergebnisse von Versuchen, welche nur an Rohabwasserproben durchgeführt wurden. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf 17 Studien aus unterschiedlichen Ländern und Regionen. Da die Abwassereigenschaften der einzelnen ARAs unterschiedlich sein können, unterscheiden sich dementsprechend die Werte der CSB-Fraktionen in der Tabelle 6-1. Veröffentlichungen, die in diesem Zusammenhang erwähnt werden sollten und welche die Ergebnisse der CSB-Fraktionen aus unterschiedlichen Ländern und Regionen zusammenfassen sind: Derin Orhon (1997), Knerr (2012), Sadecka et al.(2013) und Szaja et al. (2015);

**Tabelle 6-1:** Zusammenfassung der Mittelwerte der Literaturdaten über CSB-Fraktionen (Pasztor et al., 2008)

Land/Region	S <sub>i</sub> (%)	S <sub>s</sub> (%)	X <sub>i</sub> (%)	X <sub>s</sub> (%)	X <sub>s</sub> +X <sub>H</sub> (%)**
Nordamerika	10,5	14,1	27,9	-	44,3
Südafrika	5,0	20,0	13,0	-	62,0
Schweiz	14,0	9,0	9,0	56,0	68,0
Dänemark	2,0	20,0	18,0	40,0	60,0
Schweden	15,0	27,0	17,0	33,0	41,0
Dänemark	7,6	20,3	13,0	51,5	58,7
Dänemark	5,0	35,0	10,0	35,0	50,0

Nordamerika	12,0*	15,0	14,5*	-	59,0
Holland	6,0	26,0	39,0	-	28,0
Nordamerika	5,0	16,0	13,0	-	66,0
Frankreich	4,1	3,0	19,0	-	73,9
Deutschland	6,4	18,3	11,3	49,3	64,0
Deutschland	6,1	14,8	13,0	55,4	66,2
Italien	6,0	15,0	8,0	56,0	71,0
Spanien	8,5	18,3	24,9	33,3	48,3
Dänemark	10,0*	15,0*	20,0	40,0*	55,0*
Schweiz	4,0	10,0	20,0	54,1	66,0
<b>Mittelwert</b>	<b>7±3,6</b>	<b>18±7,1</b>	<b>17±7,6</b>	<b>46±9,1</b>	<b>58±11,7</b>

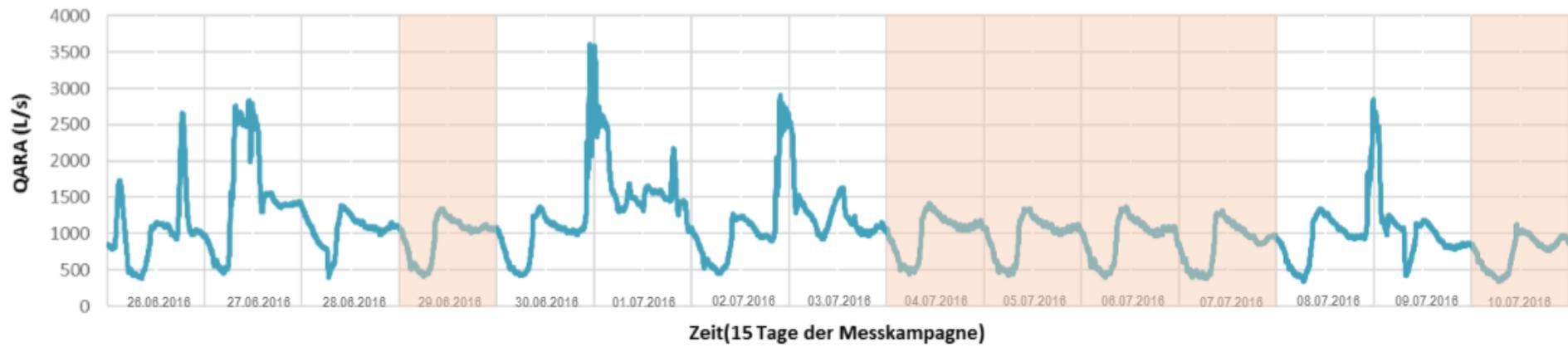
\*auf Fachzeitschriften basierte Schätzungen, \*\* X<sub>S</sub>-Anteil + heterotropher Biomassenanteil X<sub>H</sub>

Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten 15-tägigen Messkampagne sind der Tabelle 6-2 zu entnehmen. Tabelle 6-2 zeigt außerdem auch die täglichen Zulaufmengen zur ARA Graz-Gössendorf und die dazugehörigen Konzentrationen für den BSB<sub>5</sub>, den CSB<sub>GES</sub>, den BSB<sub>∞</sub> und die jeweiligen CSB-Fractionen. Die Berechnung der einzelnen CSB-Fractionen anhand der SOP ist in Anhang D im Detail beschrieben.

Die Tabelle 6-2 stellt die gesamten Ergebnisse der im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten 15-tägigen Messkampagne dar. Dabei wurden Trockenwettertage farblich hinterlegt. Als Trockenwettertag gilt ein Tag, dessen täglicher Zulauf zur ARA 90.000 m<sup>3</sup>/d nicht überschritten wird und welcher keine ausgeprägten Abflussspitzen aufweist. Die täglichen Zulaufmengen zur ARA und ev. Abflussspitzen können aus der Tabelle 6-2 bzw. Abbildung 6-1 entnommen werden. Insgesamt traten nach dieser Definition während der 15 Tage nur 6 Trockenwetter- und 9 Regenwettertage auf.

**Tabelle 6-2:** Die absoluten Ergebnisse der 15-tägigen Messkampagne und die zugehörige Zulaufmenge zur ARA Graz-Gössendorf

Trocken- wetter:	NEIN	NEIN	NEIN	JA	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN	NEIN	JA
Datum	26.06.2016	27.06.2016	28.06.2016	29.06.2016	30.06.2016	01.07.2016	02.07.2016	03.07.2016	04.07.2016	05.07.2016	06.07.2016	07.07.2016	08.07.2016	09.07.2016	10.07.2016
CSB <sub>GES,ZUL</sub> (mg/L)	590±16,0	556±6,1	831±8,5	699±8,8	602±3,3	562±20,4	511±7,3	535±4,1	675±7,1	643±9,7	763±9,9	736±14,4	644±4,2	608±10,0	645±6,8
CSB <sub>GES,ZUL,0,45</sub> (mg/L)	94±0,9	86±0,5	162±0,8	156±0,5	130±2,1	117±2,1	88±0,5	104±1,7	129±1,4	117±0,5	149±1,0	157±0,5	150±±0,5	142±0,5	112±0,8
CSB <sub>GES,ZUL,0,1</sub> (mg/L)	88±1,2	78±1,7	156±0,5	134±1,7	113±0,8	98±0,8	81±0,5	97±1,0	121±0,8	110±1,7	141±0,94	163±3,3	151±1,4	130±0,0	112±3,1
BSB <sub>5,ZUL</sub> (mg/L)	344±2,8	315±4,5	537±5,2	434±8,0	311±5,2	287±0,0	310±0,0	321±8,0	432±9,4	383±4,9	468±8,0	456±8,01	359±2,8	345±5,2	383±9,0
CSB <sub>GES,ABL</sub> (mg/L)	-	38±0,9	33±5,1	25±0,4	28±1,0	17±0,5	23±0,3	24±2,1	27±0,4	22±0,7	21±0,4	24±0,4	31±0,7	26±0,8	23±0,5
CSB <sub>GES,ABL,0,1</sub> (mg/L)	-	18±0,3	20±0,6	18±0,6	17±0,28	15±0,0	17±0,0	17±0,0	18±0,2	16±0,2	17±0,1	25±0,61	23±0,6	25±0,6	24±0,8
BSB <sub>5,ABL</sub> (mg/L)	-	16±0,3	11±0,8	11±0,37	9±0,5	6±0,37	8±0,2	13±0,8	14±0,6	10±0,3	8±0,2	7±0,4	10±0,3	12±0,4	10±0,4
BSB <sub>∞</sub> (mg/L)	410	389	631	520	368	371	371	359	488	453	556	531	457	409	440
CSB/BSB <sub>5</sub> (-)	1,7	1,8	1,5	1,6	1,9	2,0	1,6	1,7	1,6	1,7	1,6	1,6	1,8	1,8	1,7
AFS <sub>ZUL</sub> (mg/L)	271±0,9	235±1,0	439±1,0	315±3,1	285±4,1	259±1,0	244±12,3	297±2,49	327±6,2	305±3,4	341±4,0	279±6,8	295±6,2	296±2,8	313±9,3
AFS <sub>ABL</sub> (mg/L)	-	15±0,5	11±0,0	4±0,5	8±1,4	1±0,1	4±0,5	5±0,5	8±1,2	3±0,5	2±0,5	5±0,5	12±0,0	6±2,1	4±0,9
<i>S<sub>s</sub></i> (mg/L)	72	61	140	119	98	83	66	79	106	93	118	142	129	108	89
<i>X<sub>s</sub></i> (mg/L)	339	328	491	422	271	288	305	281	382	360	438	389	329	301	351
<i>S<sub>i</sub></i> (mg/L)	16	18	16	15	15	15	15	19	15	16	22	20	22	22	24
<i>X<sub>i</sub></i> (mg/L)	163	150	184	143	218	176	125	157	172	175	184	184	165	177	182
Q <sub>ARA</sub> (m <sup>3</sup> /d)	88.969	131.679	91.255	82.702	92.487	143.953	94.417	108.345	85.831	82.875	80.684	73.644	84.459	91.081	64.396



**Abbildung 6-1:** Grafische Darstellung der zugehörigen Zulaufmengen zur ARA Graz-Gössendorf mit farblich hinterlegten Trockenwettertagen

Die Ergebnisse der einzelnen CSB-Fractionen für die 6 Trockenwettertage (TW-Tage) der 15-tägigen Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf sind in der Tabelle 6-3 in absoluten Konzentrationen bzw. in der Tabelle 6-4 relativ bezogen auf die jeweiligen CSB<sub>GES</sub>-Werte dargestellt. Da der Biomassenanteil  $X_B$  bzw.  $X_H$  nach der angewandten Bestimmungsmethode für  $X_S$  nicht explizit sondern gemeinsam mit dem  $X_S$  mitbestimmt wurde, was nach Pasztor et al. (2008) sehr oft der Fall ist, kann der  $X_S$  alleine nicht angegeben werden und stellt daher immer die Summe aus  $X_S+X_H$  dar. Aus diesem Grund verfügen die Ergebnistabellen allesamt sowohl über  $X_S$ - als auch über  $X_S+X_H$ -Spalten, um einen Vergleich der Daten aus der Messkampagne auch mit jenen aus der Literatur in der Tabelle 6-1 zu ermöglichen.

**Tabelle 6-3:** Zusammenfassung der Ergebnisse der absoluten CSB-Fractionen für die 6 TW-Tage der 15-tägigen Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf

Datum	$S_i$ (mg/L)	$S_s$ (mg/L)	$X_i$ (mg/L)	$X_s$ (mg/L)	$X_s+X_H$ (mg/L)
29.06.2016	15	119	143	-	422
04.07.2016	15	106	172	-	382
05.07.2016	16	93	175	-	360
06.07.2016	22	118	184	-	438
07.07.2016	20	142	184	-	389
10.07.2016	24	89	182	-	351
<b>Mittelwert</b>	<b>19 ± 4</b>	<b>111 ± 18</b>	<b>173 ± 14</b>	-	<b>390 ± 31</b>

**Tabelle 6-4:** Zusammenfassung der Ergebnisse der relativen CSB-Fractionen für die 6 TW-Tage der 15-tägigen Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf

Datum	$S_i$ (%)	$S_s$ (%)	$X_i$ (%)	$X_s$ (%)	$X_s+X_H$ (%)
29.06.2016	2	17	21	-	60
04.07.2016	2	16	26	-	56
05.07.2016	2	15	27	-	56
06.07.2016	3	16	24	-	57
07.07.2016	3	19	25	-	53
10.07.2016	4	14	28	-	54
<b>Mittelwert</b>	<b>3 ± 0,8</b>	<b>16 ± 1,6</b>	<b>25 ± 2,3</b>	-	<b>56 ± 2,2</b>

Wie aus Tabelle 6-5 ersichtlich ist, unterscheiden sich im Trockenwetterfall die Mittelwerte der ermittelten CSB-Fractionen der ARA Graz-Gössendorf nicht wesentlich von den Literaturwerten in der Tabelle 6-1:

**Tabelle 6-5:** Gegenüberstellung der Literaturdaten der CSB-Fraktionierung mit den Ergebnissen der 6 TW-Tage der Messkampagne auf der ARA Graz-Gössendorf

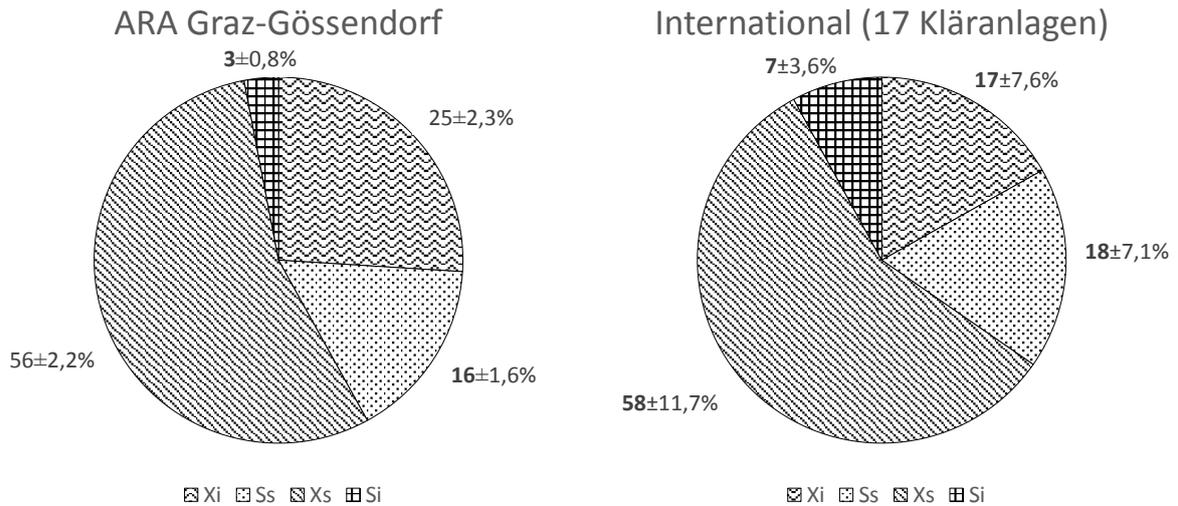
	$S_i$ (%)	$S_s$ (%)	$X_i$ (%)	$X_s$ (%)	$X_s+X_H$ (%)
ARA Graz Gössendorf	<b>3 ± 0,8</b>	<b>16 ± 1,6</b>	<b>25 ± 2,3</b>	-	<b>56 ± 2,2</b>
International	<b>7 ± 3,6</b>	<b>18 ± 7,1</b>	<b>17 ± 7,6</b>	-	<b>58 ± 11,7</b>

Im Vergleich zu den internationalen Mittelwerten waren vor allem die CSB-S<sub>i</sub>-Anteile in den Tageszulaufproben der ARA Graz-Gössendorf mit  $3 \pm 0,8 \%$  gegenüber  $7 \pm 3,6 \%$  deutlich geringer. Etwas geringer waren bei den Grazer-Werten auch die S<sub>s</sub>- und die (X<sub>s</sub>+X<sub>H</sub>)-Werte, wohingegen die X<sub>i</sub>-Werte mit  $25 \pm 2,3 \%$  gegenüber  $17 \pm 7,6 \%$  bei den internationalen Werten deutlich höher waren.

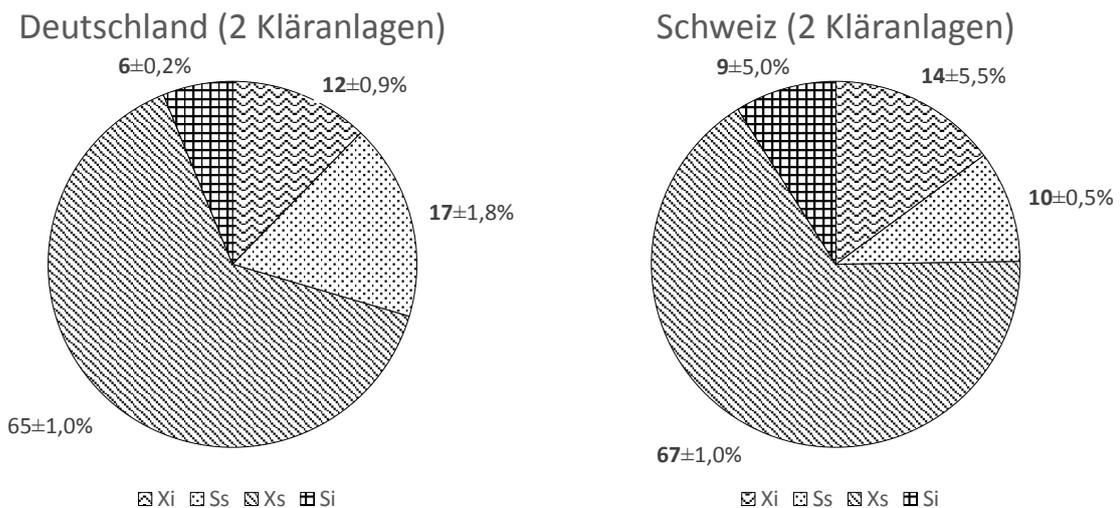
Die ermittelten CSB-Fraktionen der ARA Graz-Gössendorf (**X<sub>i</sub>=25 ± 2,3 %**, **X<sub>s</sub>=56 ± 2,2 %**, **S<sub>i</sub>=3 ± 0,8 %**, **S<sub>s</sub>=16 ± 1,6 %**;) sind demnach mit den Werten aus der Literatur (**X<sub>i</sub>=17 ± 7,6 %**, **X<sub>s</sub>=58 ± 11,7 %**, **S<sub>i</sub>=7 ± 3,6 %**, **S<sub>s</sub>=18 ± 7,1 %**;) durchaus vergleichbar. Aus den recherchierten Daten in der Tabelle 6-1 kann abgelesen werden, dass die CSB-Fraktionen von Land zu Land sehr stark variieren können. Dennoch lassen sich in der Tabelle 6-1 einige länderspezifische Eigenarten feststellen. So kann beispielsweise aus dieser Tabelle gefolgert werden, dass die holländischen Abwässer größere Konzentrationen an X<sub>i</sub> ergaben, während die untersuchten Abwässer aus der Schweiz und auch aus Italien deutlich geringere X<sub>i</sub> aufwiesen. Da die Menge der zurzeit vorhandenen Daten für eine seriöse statistische Auswertung jedoch noch immer sehr gering ist, können solche allgemeinen Schlussfolgerungen nur mit Vorsicht gemacht werden. Auch die Tatsache, dass es bislang keine normierten Verfahren zur Ermittlung der CSB-Fraktionen gibt bzw. dass die Literaturwerte auf unterschiedlichen Bestimmungsmethoden basieren, macht allgemeingültige Aussagen schwierig. Außerdem sollte man sich bei der Interpretation der Werte immer auf eine bestimmte ARA beziehen und nicht auf gesamte Länder oder Regionen. Trotzdem können nach Pasztor et al. (2008) die folgenden Schlüsse gezogen werden:

- Ein höherer X<sub>i</sub> scheint eine längere hydraulische Verweilzeit zu implizieren.
- Ein geringer S<sub>i</sub> wiederum eine schwache Belastung durch Industrieabwässer.

Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 stellen die Ergebnisse der im Rahmen dieser Masterarbeit erhobenen CSB-Fraktionen bei Trockenwetterbedingungen den Daten der internationalen Recherche aus der Literatur auf Basis von Mittelwerten (siehe Tabelle 6-1) grafisch gegenüber.



**Abbildung 6-2:** Gegenüberstellung der Mittelwerte der CSB-Fractionen an den 6 TW-Tagen im Zulauf der ARA Graz-Gössendorf mit internationalen Literaturwerten (Pasztor et al., 2008)



**Abbildung 6-3:** Gegenüberstellung der Mittelwerte der CSB-Fractionen aus Deutschland und der Schweiz (Pasztor et al., 2008)

In der Tabelle 6-6 sind die absoluten CSB-Fractionen der 9 Regenwettertage (RW-Tage) der 15-tägigen Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf und in der Tabelle 6-7 die relativen CSB-Fractionen bezogen auf CSB<sub>GES</sub> zusammengefasst:

**Tabelle 6-6:** Zusammenfassung der absoluten CSB-Fraktionen für die 9 RW-Tage der 15-tägigen Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf

Datum	S <sub>i</sub> (mg/L)	S <sub>s</sub> (mg/L)	X <sub>i</sub> (mg/L)	X <sub>s</sub> (mg/L)	X <sub>s</sub> +X <sub>H</sub> (mg/L)
26.06.2016	16	72	163	-	339
27.06.2016	18	61	150	-	328
28.06.2016	16	140	184	-	491
30.06.2016	15	98	218	-	271
01.07.2016	15	83	176	-	288
02.07.2016	15	66	125	-	305
03.07.2016	19	79	157	-	281
08.07.2016	22	129	165	-	329
09.07.2016	22	108	177	-	301
<b>Mittelwert</b>	<b>18 ± 3</b>	<b>93 ± 26</b>	<b>168 ± 24</b>	-	<b>326 ± 62</b>

**Tabelle 6-7:** Zusammenfassung der relativen CSB-Fraktionen für die 9 RW-Tage der 15-tägigen Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf

Datum	S <sub>i</sub> (%)	S <sub>s</sub> (%)	X <sub>i</sub> (%)	X <sub>s</sub> (%)	X <sub>s</sub> +X <sub>H</sub> (%)
26.06.2016	3	12	28	-	57
27.06.2016	3	11	27	-	59
28.06.2016	2	17	22	-	59
30.06.2016	2	17	36	-	45
01.07.2016	3	15	31	-	51
02.07.2016	3	13	24	-	60
03.07.2016	3	15	29	-	53
08.07.2016	3	20	26	-	51
09.07.2016	4	18	29	-	49
<b>Mittelwert</b>	<b>3 ± 0,6</b>	<b>15 ± 2,8</b>	<b>28 ± 3,8</b>	-	<b>54 ± 4,9</b>

Wie zu erwarten war, lagen die CSB<sub>GES</sub>-Konzentrationen der 9 RW-Tage durch den Einfluss des verdünnenden Regenwassers mit 604 ± 94 mg/L deutlich niedriger als der Mittelwert der 6 TW-Tage (694 ± 48 mg/L) und streuten auch weniger stark um den Mittelwert. Vergleicht man die absoluten CSB-Fraktionen auf Basis der Mittelwerte, so waren die S<sub>i</sub> und X<sub>i</sub>-Konzentrationen an den TW-Tagen allerdings nur um + 6 % bzw. + 3 % höher, wohingegen die S<sub>s</sub>- und X<sub>s</sub>-Werte beide mit ca. + 20 % deutlich höher waren als an den 9 RW-Tagen (siehe Tabelle 6-8).

**Tabelle 6-8:** Gegenüberstellung der absoluten CSB-Fraktionen für die Mittelwerte der 6 TW- und 9 RW-Tage während der 15-tägigen Messkampagne

Datum	S <sub>i</sub> (mg/L)	S <sub>s</sub> (mg/L)	X <sub>i</sub> (mg/L)	X <sub>s</sub> (mg/L)	X <sub>s</sub> +X <sub>H</sub> (mg/L)
TW-Tage	19 ± 4	111 ± 18	173 ± 14	-	390 ± 31
RW-Tage	18 ± 3	93 ± 26	168 ± 24	-	326 ± 62

Vergleicht man die CSB-Fraktionen nur auf Basis der Mittelwerte der relativen Werte bezogen jeweils auf die CSB<sub>GES</sub>-Konzentrationen so unterschieden sich die TW-Werte von den RW-Werten deutlich weniger stark und lagen in etwa in denselben Bereichen

(Tabelle 6-9), wobei die  $S_i$ - und  $S_s$ -Werte fast gleich, die  $X_i$ -Werte an den RW-Tagen etwas höher und dafür die  $(X_s+X_H)$ -Werte an den TW-Tagen etwas niedriger waren.

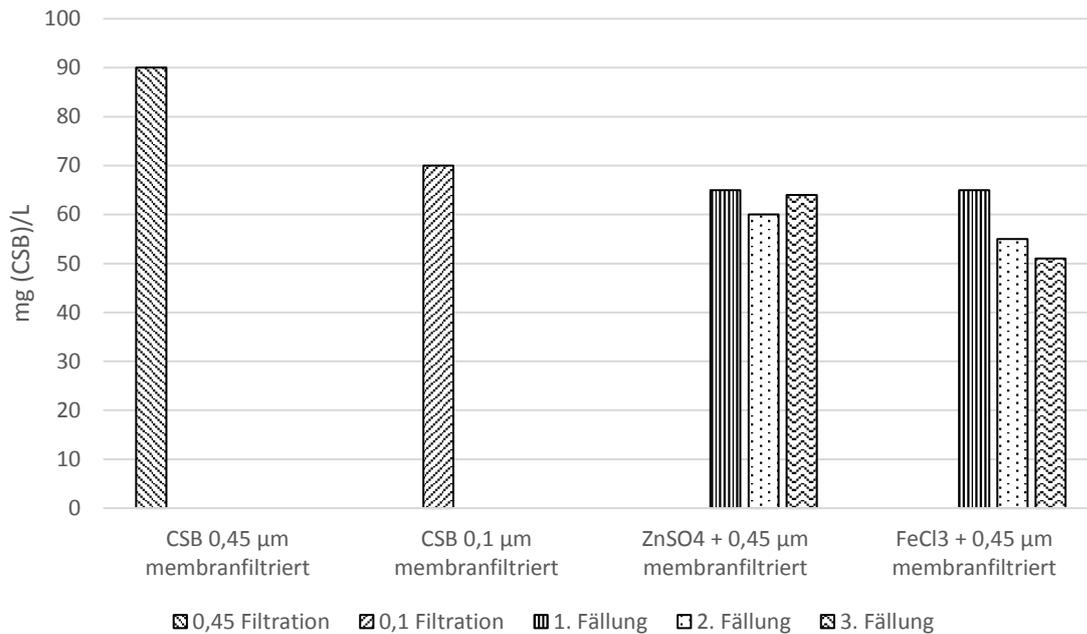
**Tabelle 6-9:** Gegenüberstellung der relativen CSB-Fractionen für die Mittelwerte der 6 TW- und 9 RW-Tage während der 15-tägigen Messkampagne

Datum	$S_i$ (%)	$S_s$ (%)	$X_i$ (%)	$X_s$ (%)	$X_s+X_H$ (%)
TW-Tage	$3 \pm 0,8$	$16 \pm 1,6$	$25 \pm 2,3$	-	$56 \pm 2,2$
RW-Tage	$3 \pm 0,6$	$15 \pm 2,8$	$28 \pm 3,8$	-	$54 \pm 4,9$

## 6.1. Ergebnisse der Testversuche mit Fällung

Abbildung 6-4 stellt das Ergebnis der im Rahmen der Masterarbeit durchgeführten Testversuche mit unterschiedlichen Fällungsmitteln zur Bestimmung des kolloidalen CSB-Anteils dar. Die Ergebnisse sind im Detail im Anhang F enthalten. Das Ergebnis zeigt jene Menge der CSB-Fractionen an, die nach der Filtration bzw. nach der Fällung im Abwasser zurückbleibt. Dabei wurde deutlich, dass die Fällung die besseren Ergebnisse erzielt, wenn es sich um die Entfernung der gelösten und kolloidalen CSB-Fractionen aus dem Abwasser handelt. Die Vermutung, dass bei den Fällungen allerdings auch gelöste Stoffe (Monosaccharide, Polysaccharide und Aminosäuren) entfernt werden (Gillot & Choubert, 2010), welche für die Bestimmung der  $S_s$ -Fraktion relevant sind, war schließlich auch ein Grund, warum auf den Fällungsschritt schlussendlich verzichtet wurde. Der Verzicht auf den Fällungsschritt stellt auch eine umweltfreundlichere (chemikalienfreie) Variante der Entfernung der kolloidalen Stoffe aus den Abwasserproben dar.

Die Testversuche (Anhang F), die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführt wurden, zeigten, dass die Filtration mit einem  $0,1 \mu\text{m}$ -Filter zum Zwecke der Abtrennung der kolloidalen Stoffe auch hinreichend genau verwendet werden kann.

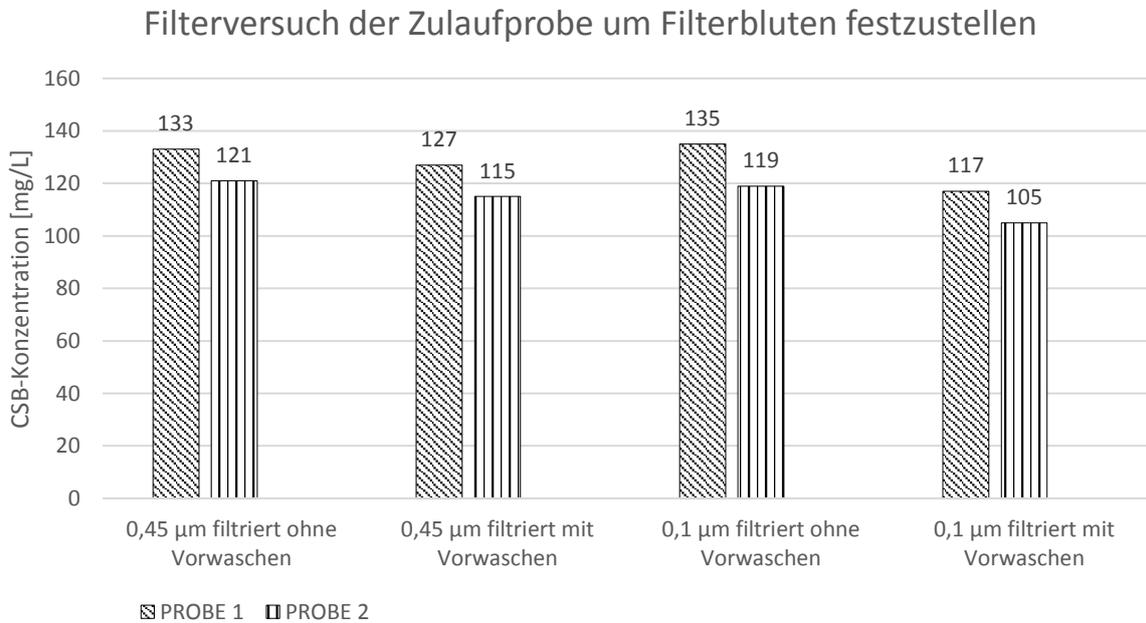


**Abbildung 6-4:** CSB-Restkonzentrationen nach der Fällung bzw. Filtration der Zulaufproben der ARA Graz-Gössendorf in den Filtraten

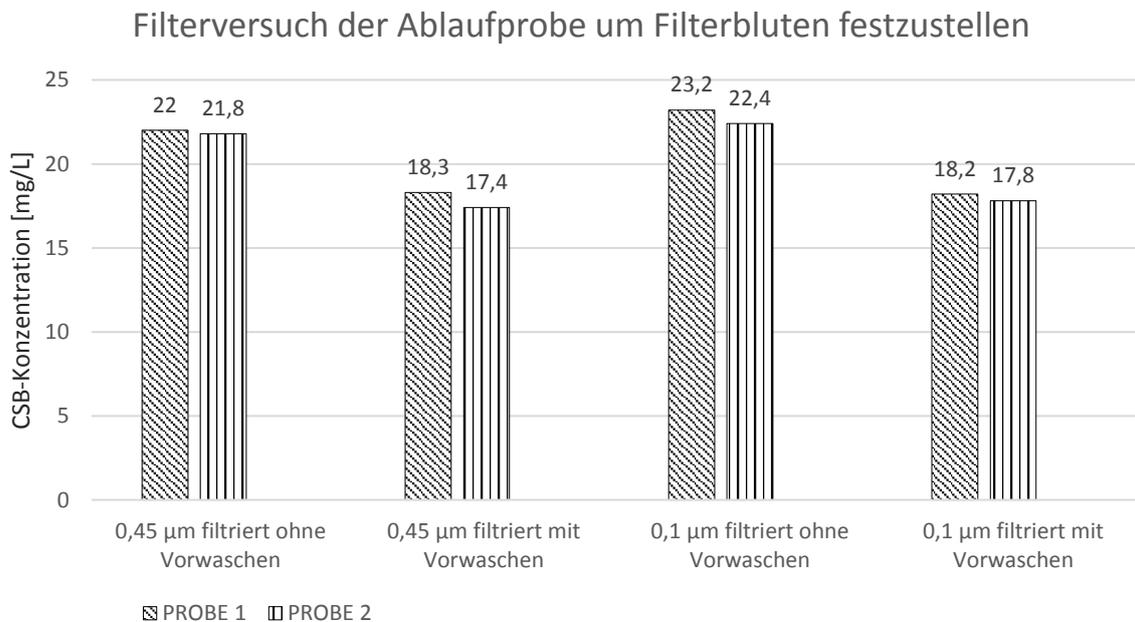
## 6.2. Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Filterauslösung

Wie bereits erwähnt, wurde im Rahmen der durchgeführten 15-tägigen Messkampagne eine zweistufige Filtration zur Bestimmung des kolloidalen CSB-Anteils durchgeführt. Die Abwasserprobe wurde dafür aufgrund der Verstopfungsgefahr des 0,1 µm-Filters zunächst mit einem 0,45 µm-Filter vorfiltriert. Bei einigen Versuchen wurde festgestellt, dass das 0,1 µm-Filtrat der Abwasserprobe eine höhere CSB-Konzentration aufwies als das zu filtrierende 0,45 µm-Filtrat (siehe Anhang E). Dieses eigentlich unlogische Phänomen kann durch das sogenannte „Filterbluten“ erklärt werden. Beim „Bluten“ des Filters kann es passieren, dass CSB-haltige Stoffe aus dem Filtermaterial herausgelöst werden und dadurch die CSB-Konzentration im Filtrat erhöhen können. Nachträgliche Testversuche (Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6), die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die Vorreinigung der Filter mit Reinstwasser die CSB-Konzentrationen der Filtrate um 5 - 20 % verringern kann. Da dieses Phänomen erst bei der nachträglichen Analyse der Daten festgestellt wurde, konnte diese wichtige Erkenntnis nicht mehr für die Untersuchungen und Analysen im Rahmen dieser Masterarbeit genutzt werden, sodass darauf hingewiesen werden muss, dass sämtliche in der Masterarbeit durchgeführten Filtrationen mit nicht mit Reinstwasser vorgereinigten 0,45 µm- und 0,10 µm-Zellulose-Nitrat-Filtern durchgeführt wurden. Die zum Thema „CSB-Fraktionierung“ vorhandene Literatur beschreibt dieses Problem nicht. Diese Erkenntnis wurde aber schließlich als dringend empfohlener Filtervorreinigungsschritt in die SOP im Anhang A eingearbeitet. Die oben beschriebene Verringerung der CSB-Konzentrationen durch den empfohlenen Filtervorreinigungsschritt um 5 - 20 % hat letztendlich höhere  $X_s$ - und niedrigere  $S_s$ - bzw.

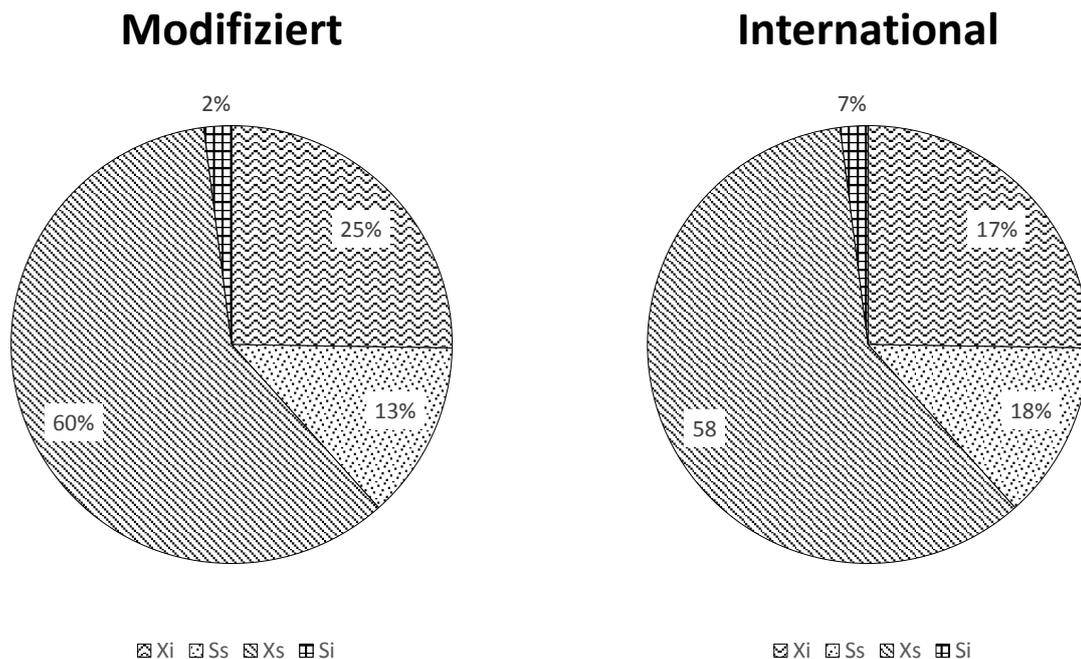
Si-Werte zur Folge. Das trifft allerdings nur bei den in dieser Masterarbeit angewandten Bestimmungsmethoden für die CSB-Fraktionen zu. In der Abbildung 6-7 wurde versucht, diesen Einfluss auf die resultierenden CSB-Fraktionen durch eine Filtervorreinigung abzuschätzen, indem die CSB-Konzentration im 0,1 µm-Filtrat generell um 15 % verringert wurden (modifizierte Ermittlung der einzelnen CSB-Fraktionen).



**Abbildung 6-5:** Filtervorreinigungsversuche mit den Zulaufproben, um Filterbluten in den 24 h-Mischprobe festzustellen



**Abbildung 6-6:** Filtervorreinigungsversuche mit den Ablaufproben, um Filterbluten in den 24 h-Mischproben festzustellen



**Abbildung 6-7:** Gegenüberstellung der modifizierten Ergebnisse für die einzelnen CSB-Fractionen mit den internationalen Werten, wobei die CSB-Konzentrationen der filtrierten Proben generell um 15 % verringert wurden.

### 6.3. Ergebnisse des $BSB_5/BSB_\infty$ Verhältnisses

In Anlehnung an die Studie von Sadecka et al. (2013) wurde das Verhältnis von  $BSB_5$  zu  $BSB_\infty$  analysiert. Dieses Verhältnis kann nach dem Aufbau eines  $BSB_5/BSB_\infty$ -Datensatzes für eine untersuchte Kläranlage auch als Bestimmungsmethode für den  $BSB_\infty$  dienen. Diese alternative Ermittlungsmethode basiert auf der Annahme, dass das  $BSB_5/BSB_\infty$ -Verhältnis für jede ARA spezifisch ist und nur in einem engen Bereich streut. Eine zukünftige Kombination des aufgebauten Datensatzes mit den Werten der  $BSB_5$ -Messungen ermöglicht demnach auch eine Bestimmung des  $BSB_\infty$ . In der Tabelle 6-10 werden diese Werte für die 6 Trockenwettertage und in der Tabelle 6-11 für die 9 Regenwettertage getrennt dargestellt. Danach zeigte sich, dass das  $BSB_5/BSB_\infty$ -Verhältnis während der durchgeführten Messkampagne an den 6 Trockenwettertagen bei der ARA Graz-Gössendorf im Durchschnitt bei sehr stabilen  $0,85 \pm 0,02$  und an den 9 Regenwettertagen bei etwas geringeren dafür allerdings etwas stärker schwankenderen  $0,83 \pm 0,04$  [-] lag.

Erwartungsgemäß lagen dabei die  $BSB_5$ -Regenwetterkonzentrationen der Tageszulaufproben durch den Regenwettereinfluss mit Ausnahme des 28.06.2016 jeweils deutlich unterhalb der Trockenwetterkonzentrationen, was sich allerdings auf das  $BSB_5/BSB_\infty$ -Verhältnis nur sehr geringfügig auswirkte.

**Tabelle 6-10:** BSB<sub>5</sub>/BSB<sub>∞</sub>-Verhältnis für die 6 TW-Tage (Ergebnisse der Messkampagne im Zulauf der ARA-Graz-Gössendorf, durchgeführt im Juni und Juli 2016)

Datum	BSB <sub>5</sub> (mg/L)	BSB <sub>∞</sub> (mg/L)	BSB <sub>5</sub> /BSB <sub>∞</sub> (-)
29.06.2016	434	520	0,83
04.07.2016	432	488	0,88
05.07.2016	383	453	0,84
06.07.2016	468	556	0,84
07.07.2016	456	531	0,85
10.07.2016	383	440	0,87
<b>Mittelwert</b>	-	-	<b>0,85 ± 0,02</b>

**Tabelle 6-11:** BSB<sub>5</sub>/BSB<sub>∞</sub>-Verhältnis für die 9 RW-Tage während der Messkampagne im Zulauf der ARA-Graz-Gössendorf

Datum	BSB <sub>5</sub> (mg/L)	BSB <sub>∞</sub> (mg/L)	BSB <sub>5</sub> /BSB <sub>∞</sub> (-)
26.06.2016	344	411	0,84
27.06.2016	315	389	0,81
28.06.2016	537	631	0,85
30.06.2016	311	368	0,85
01.07.2016	287	371	0,77
02.07.2016	310	371	0,84
03.07.2016	321	360	0,90
08.07.2016	359	457	0,79
09.07.2016	345	409	0,84
<b>Mittelwert</b>			<b>0,83 ± 0,04</b>

## 7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse der Messkampagne zur CSB-Fraktionierung des Grazer Abwassers zeigten, dass die gewählten Methoden zur Bestimmung der einzelnen CSB-Fraktionen zufriedenstellende Resultate ergeben haben. Die damit ermittelten CSB-Fraktionen sind mit den Literaturwerten, vor allem aber mit den Daten aus den restlichen deutschsprachigen Ländern, durchaus vergleichbar. Die Mittelwerte aus den 6 TW-Tagen während der durchgeführten 15-tägigen Messkampagne weichen von den Mittelwerten der Literaturdaten wie folgt ab:

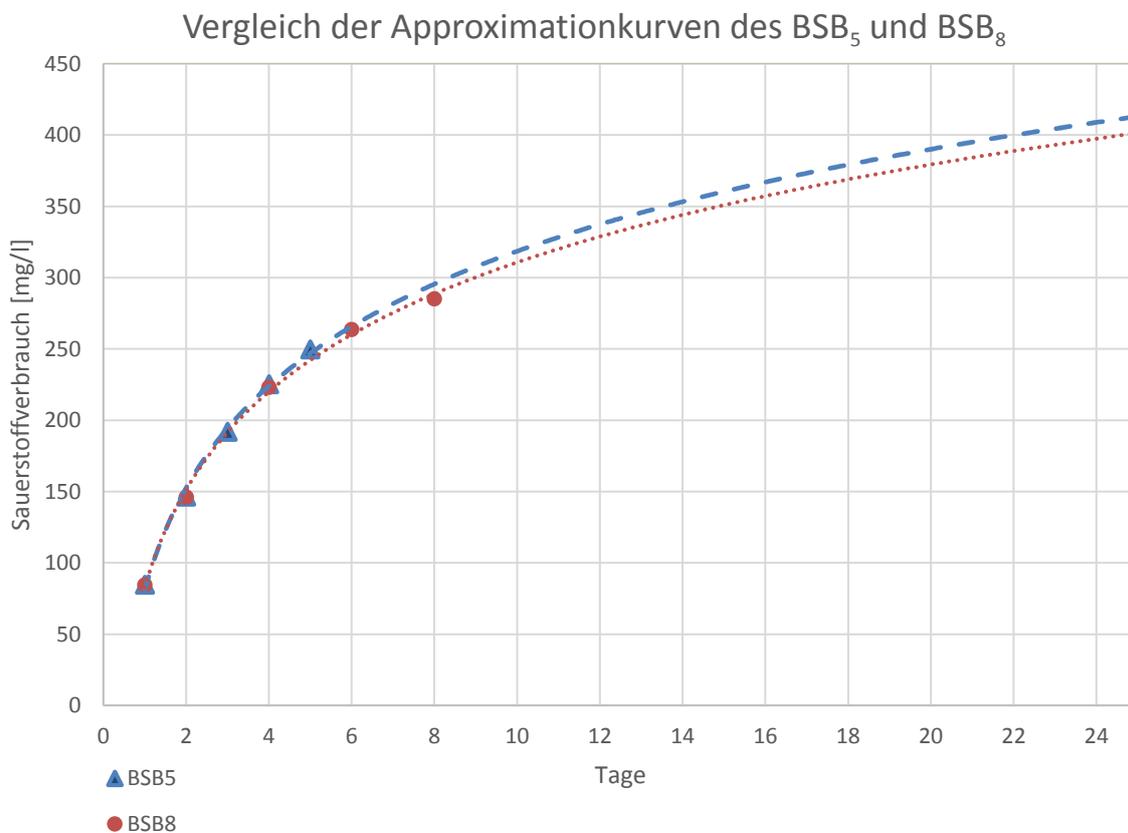
- 4 % für  $S_i$ -Fraktion (gelöst inerte CSB-Fraktion)
- 2 % für  $S_s$ -Fraktion (schnell abbaubare CSB-Fraktion)
- 8 % für  $X_i$ -Fraktion (inert partikuläre CSB-Fraktion)
- 2 % für  $X_s$ -Fraktion (gelöst partikuläre CSB-Fraktion)

Die Unterschiede im Vergleich zu den Literaturwerten aus den deutschsprachigen Ländern sind vernachlässigbar klein und können auf die jeweiligen Systemspezifika der ARAs zurückgeführt werden. Obwohl die relativ einfachen und im Rahmen dieser Masterarbeit angewandten Bestimmungsmethoden der einzelnen CSB-Fraktionen dzt. am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz noch in der Entwicklungs- bzw. Etablierungsphase sind, konnten die im Rahmen dieser Masterarbeit erzielten Ergebnisse auch im Vergleich zu den recherchierten Literaturwerten bereits überzeugen.

Die durchzuführende Modifikation bei der Methode zur Bestimmung des  $X_s$  nach Roelvelde & Loosdrecht (2002) ergab ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse. Diese Modifikation, die aufgrund der Limitierung bei den BSB-Aufzeichnungen auf 5 Tage durchgeführt werden müssen, kann auch als ein Schwachpunkt bei der verwendeten Methode angesehen werden. Die mittels Regression ermittelte  $BSB_{tot}$ -Kurve auf Basis des  $BSB_8$  (Abbildung 7-1) sollte nämlich anders als die Kurve auf Basis des  $BSB_5$  verlaufen, da die Kurve des BSB i. d. R. erst nach 5 Tagen einen flacheren Verlauf annimmt. Ein zukünftiger Umstieg auf  $BSB_8$ -Messungen und damit die vollständige Anwendung der Methode nach Roelvelde & Loosdrecht (2002) zur Bestimmung der  $X_s$ -Fraktionen sollte angestrebt werden.

Verbesserungspotenzial sehe ich auch bei der Bestimmung der  $X_i$ -Fraktion. Wie erwähnt, wirken sich dabei dzt. sämtliche Messfehler bei der Bestimmung der anderen CSB-Fraktionen auch direkt auf diese Fraktion aus, da im Rahmen dieser Masterarbeit der  $X_i$  aus der Differenz der restlichen CSB-Fraktionen vom  $CSB_{GES}$  ermittelt wurde. Eine direktere Bestimmung des  $X_i$  würde auch eine Überprüfungsmöglichkeit der restlichen CSB-Fraktionen erlauben. Eine Alternative zur Ermittlung des  $X_i$  wäre z. B. die Ermittlung über den Glühverlust (siehe Kapitel 3.4.1).

Das Vorreinigen der Zellulose-Nitrat-Filter (Membranfilter) mit Reinstwasser gegen das „Filterbluten“ wurde in den Ergebnissen dieser Masterarbeit nicht berücksichtigt, da dieses Phänomen erst gegen Ende der Masterarbeit entdeckt wurde. Jedoch wurde aufgrund der nachträglichen Testversuche dieser empfohlene Arbeitsschritt noch in die für das Institutslabor im Rahmen der Masterarbeit erstellte SOP mitaufgenommen. Die Ergebnisse der Testversuche in der Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 zeigen, dass die zusätzlichen in das Filtrat gelangenden CSB-Konzentration relativ stark variierten. Die Verwendung eines Filters, welcher garantiert keine CSB- bzw. Kohlenstoffverbindungen in das Filtrat emittiert, wäre eine Alternative zum empfohlenen Vorreinigen der verwendeten Filter.



**Abbildung 7-1:** Vergleich der Approximationskurven des  $BSB_5$  und  $BSB_8$  Messdaten laut Roeleveld & Loosdrecht (2002)

Erweiterungs- bzw. weiteres Vereinfachungspotenzial sehe ich auch in einer vereinfachten Ermittlung des  $BSB_\infty$ -Wertes, da seine Bestimmung den mit Abstand zeitaufwendigsten Arbeitsschritt darstellt. Eine Möglichkeit hierfür besteht z. B. darin, den  $BSB_\infty$  aus dem Verhältnis des  $BSB_5/BSB_\infty$  zu ermitteln. Dafür könnte ein repräsentativer Datensatz von  $BSB_5/BSB_\infty$ -Verhältniswerten bei Trockenwetterbedingungen aufgebaut werden, aus dem dann die  $BSB_\infty$ -Werte abgeschätzt werden könnten. Die Tatsache, dass dieser Wert zumeist in einem engen Bereich variiert und für jede ARA spezifisch ist, macht eine pauschale Annahme dieses Wertes unmöglich. Ein ähnlicher

Ansatz zur  $BSB_{\infty}$ -Bestimmung wurde von Sadecka et al. (2013) empfohlen und angewandt. Die Ergebnisse der durchgeführten Messkampagne im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf zeigten für die 6 untersuchten Trockenwettertage, dass dieses Verhältnis dort im Durchschnitt bei  $0,85 \pm 0,02[-]$  lag.

Nachdem es während der 15-tägigen Messkampagne an 9 Tagen regnerisch war, lassen sich auch erste Schlussfolgerungen auf die CSB-Fractionen bei Regenwettereinfluss im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf machen. Wie zu erwarten war, lagen die  $CSB_{GES}$ -Konzentrationen der 9 RW-Tage durch den Einfluss des verdünnenden Regenwassers mit  $604 \pm 89$  mg/L deutlich niedriger als der Mittelwert der 6 TW-Tage ( $694 \pm 45$  mg/L) und streuten auch etwas stärker um den Mittelwert der Untersuchungstage. Vergleicht man die absoluten CSB-Fractionen auf Basis der Mittelwerte, so waren die  $S_i$  und  $X_i$ -Konzentrationen bei den TW-Tagen allerdings nur um + 6 % bzw. + 3 % höher, wohingegen die  $S_s$ - und  $X_s$ -Werte beide mit ca. + 20 % deutlich höher waren als an den 9 RW-Tagen. Vergleicht man die CSB-Fractionen nur auf Basis der Mittelwerte der relativen Werte bezogen jeweils auf die  $CSB_{GES}$ -Konzentrationen so unterschieden sich die TW-Werte von den RW-Werten deutlich weniger stark und lagen in etwa in denselben Bereichen, wobei die  $S_i$ - und  $S_s$ -Werte fast gleich, die  $X_i$ -Werte an den RW-Tagen etwas höher und dafür die  $(X_s+X_H)$ -Werte an den TW-Tagen etwas niedriger waren.

---

## Literaturverzeichnis

- AAEV (1996) Abwasseremissionsverordnung, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft.
- Abteilung 15 der Steiermärkischen Landesregierung (2015) Dokumentation der Anlagenaufsicht - Abwasser.
- Abteilung 15 der Steiermärkischen Landesregierung (2014) Dokumentation der Gewässeraufsicht.
- ATV-DVWK (2000) Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 - Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Germany.
- ATV-DVWK (1997) Simulation von Kläranlagen - 1. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.11.4. Korrespondenz Abwasser, 44(11), 2064–2074.
- Bever, J., Stein, A., and Teichmann, H. (2002) Weitergehende Abwasserreinigung, Oldenbourg Industrieverlag.
- BGBl.210/1996 (1996) Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die Begrenzung von Abwasseremissionen aus Abwasserreinigungsanlagen für Siedlungsgebiete (1. AEV für kommunales Abwasser) (Bundeskanzleramt, ed.), Vienna, Austria.
- BGBl.I.7/2012 (2012) Bundesgesetz, mit dem das Chemikaliengesetz 1996 geändert wird (ChemG-Novelle 2011), Vienna, Austria.
- Brdjanovic, D., Meijer, S. C. F., López Vázquez, C. M., Hooijmans, C. M., and Loosdrecht, M. C. M. van (2015) Applications of activated sludge models,
- Derin Orhon, E. U. Ç. (1997) COD Fractionation in Wastewater Characterization—The State of the Art. , 68.
- EC (2000) Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities, L327/1, 1–71.
- EC (2006) Regulation 2006/1907/EC of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC. Official Journal of the European Communities, L136/3, 1–278.
- Ekama, G. A., Dold, P. L., and Marais, G. v R. (1986) Procedures for Determining Influent COD Fractions and the Maximum Specific Growth Rate of Heterotrophs

- in Activated Sludge Systems. [online] <http://www.iwaponline.com/wst/01806/wst018060091.htm> (Accessed September 10, 2015).
- Genthe, W. and Pliner, M. (2015) Total Oxygen Demand (TOD) An Alternative Parameter For Real-Time Monitoring Of Wastewater Organics. [online] <http://www.wateronline.com/doc/total-oxygen-demand-tod-an-alternative-parameter-for-real-time-monitoring-of-wastewater-organics-0001> (Accessed October 25, 2016).
- Gillot, S. and Choubert, J.-M. (2010) Biodegradable organic matter in domestic wastewaters: Comparison of selected fractionation techniques. *Water Science and Technology*, 62(3), 630 – 639.
- Gujer, W. (2007) *Siedlungswasserwirtschaft*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Gujer, W. (2008) *System Analysis for Water Technology*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Gujer, W. and Henze, M. (1991) Activated Sludge Modelling and Simulation. *Water Science and Technology*, 23(4-6), 1011–1023.
- Haslauer, H. C. (2014) Einsatz von Online-Tracermessungen zur Überprüfung von Durchflussmesssystemen auf Kläranlagen.
- Henze, M. (2000) *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Publishing.
- Henze, M., Grady, C. P. L. J., Gujer, W., Marais, G. V. R., and Matsuo, T. (1987) Activated Sludge Model no. 1 (Scientific and Technical Reports No.1), IAWPRC.
- Hofer, T., Maier, R., Gamerith, V., and Gruber, G. (2015) Projekt iZSK - Gemeinsame Betrachtung der Emissionen aus dem System Zentraler Speicherkanal und Kläranlage Graz durch integrierte Modellierung (Endbericht).
- Hofmann, T. (2004) *Kolloide. Chem. Unserer Zeit*, 38, 24–35.
- Jenkins, D. and Wanner, J. (2014) Activated sludge: 100 years and counting, [online] <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=843886> (Accessed September 10, 2015).
- Kainz, H., Kauch, E.-P., and Renner, H. (2005) *Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft*, Manz Verlag Schulbuch, Vienna, Austria.
- Knerr, H. (2012) Untersuchungen zur Zusammensetzung und zum Abbau von Schwarzwasser mittels des Belebungsverfahrens sowie zur Kinetik des heterotrophen und autotrophen Stoffwechsels - Deutsche Digitale Bibliothek.
- Kroiss, H., Rechberger, H., and Egle, L. (2011) "Phosphorus in Water Quality and Waste Management" in S. Kumar (ed.), *Integrated Waste Management - Volume II*. InTech. [online] <http://www.intechopen.com/books/integrated-waste->

- management-volume-ii/phosphorus-in-water-quality-and-waste-management (Accessed October 24, 2016).
- Makinia, J. (2010) *Mathematical Modelling and Computer Simulation of Activated Sludge Systems*, IWA Publishing.
- Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L., and Stensel, H. D. (2008) *Wastewater engineering : treatment and reuse*, McGraw-Hill, Boston, [Mass.]; London.
- Mudrack, K. and Kunst, S. (2003) *Biologie der Abwasserreinigung*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin.
- Neumüller, O.-A. (1979) *Römpps Chemie-Lexikon*, Franckh.
- ON (1997) ÖNORM EN1484, 1997-08-01: Anleitungen zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC), Österreichisches Normungsinstitut (ON).
- ON (1998) ÖNORM EN 1899-1, 1998-08-01: Bestimmung des Biochemischen Sauerstoffbedarfs nach n Tagen (BSB<sub>n</sub>), Österreichisches Normungsinstitut (ON).
- ON (1991) ÖNORM M 6265, 1991. Wasseruntersuchung – Bestimmung des Chemischen Sauerstoffbedarfes., Österreichisches Normungsinstitut (ON).
- Orhon, D. and Çokgör, E. U. (1997) COD Fractionation in Wastewater Characterization—The State of the Art. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 68(3), 283–293.
- Pasztor, I., Thury, P., and Pulai, J. (2008) Chemical oxygen demand fractions of municipal wastewater for modeling of wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 6(1), 51–56.
- Roeleveld, P. J. and Loosdrecht, M. C. M. van (2002) Experience with Guidelines for Wastewater Characterization in the Netherlands. *Water Science & Technology*, 45(6), 77–87.
- Sadecka, Z., Jedrezak, A., Pluciennik-Koropczuk, E., Myszograj, S., and Suchowska-Kisielewicz, M. (2013) COD Fractions in Sewage Flowing into Polish Sewage Treatment Plants. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 27(2), 185–195.
- Spanjers, H., Vanrolleghem, P. A., Olsson, G., and Dold, P. L. (1998) *Respirometry in Control of the Activated Sludge Process*, IWA Publishing.
- Szaja, A., Aguilar, J. A., and Łagód, G. (2015) Estimation of Chemical Oxygen Demand Fractions of Municipal Wastewater by Respirometric Method - Case Study. *ResearchGate*, 17(1), 289–299.
- Thomas, O. and Burgess, C. (2007) *UV-visible Spectrophotometry of Water and Wastewater*, Elsevier.

- Torrijos, M., Cerro, R.-M., Capdeville, B., Zeghal, S., Payraudeau, M., and Lesouef, A. (1994) Sequencing Batch Reactor: A Tool for Wastewater Characterization for the IAWPRC Model. *Water Science and Technology*, 29(7), 81–90.
- Vestner, R. J. and Günthert, F. W. (2001) CSB-Fraktionierung als Grundlage zur Bemessung von kommunalen Kläranlagen. *Gas- und Wasserfach. Wasser, Abwasser*, 142(9), 635–642.
- Vollertsen, J. and Hvitved-Jacobsen, T. (2002) Biodegradability of wastewater--a method for COD-fractionation. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 45(3), 25–34.
- Wang, L. K., Hung, Y.-T., and Shamma, N. K. (eds.) (2005) *Physicochemical Treatment Processes*, Humana Press, Totowa, NJ. [online] <http://link.springer.com/10.1385/159259820x> (Accessed April 7, 2016).
- Weber, S. (2013) Vergleichende Fraktionierung des CSB mittels Sauerstoffzehrungsmessung und Extinktionsmessung im UV-VIS-Bereich.
- Wentzel, M. C., Mbewe, A., and Ekama, G. A. (1995) Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentrations in municipal wastewaters. [online] [https://www.researchgate.net/profile/George\\_Ekama/publication/279890250\\_Batch\\_test\\_for\\_measurement\\_of\\_readily\\_biodegradable\\_COD\\_and\\_active\\_organism\\_concentrations\\_in\\_municipal\\_waste\\_waters.\\_Water\\_SA\\_21\\_117-124/links/55a0b22308aed84bedf4635c.pdf](https://www.researchgate.net/profile/George_Ekama/publication/279890250_Batch_test_for_measurement_of_readily_biodegradable_COD_and_active_organism_concentrations_in_municipal_waste_waters._Water_SA_21_117-124/links/55a0b22308aed84bedf4635c.pdf) (Accessed August 28, 2016).
- WERF (2003) *Methods for Wastewater Characterisation in Activated Sludge Modeling*, Water Environment Research Foundation, Alexandria, USA.
- WRG (1959) *Wasserrechtsgesetz*, Republik Österreich, Wien.

## **Anhang**

**Anhang A:** SOP zur CSB-Fraktionierung

**Anhang B:** Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)

**Anhang C:** Ergebnisse der BSB<sub>5</sub>-Messungen (OxiTop)

**Anhang D:** Errechnung der CSB-Faktionen des Trockenwetterabflusses

**Anhang E:** Filterversuch um Filterbluten festzustellen

**Anhang F:** Vorversuche (Gegenüberstellung der Fällung und Filtration)

## **Anhang A**

### **Arbeitsanweisung (SOP) zur CSB-Fraktionierung**

# **Arbeitsanweisung für die analytische Bestimmung von CSB-Fractionen**

**Geltungsbereich:**

Diese Arbeitsvorschrift gilt für die Bestimmung der CSB-Fractionen in 24 h-Tagesmischproben aus dem Zulauf der ARA Graz-Gössendorf.

**Verteiler:** Institutsvorstand, Laborleiter, Qualitätsbeauftragter, Laborant, Messtechniker, Lehrlinge

**Erstellt:** Aleksandar Simić

**Datum der letzten Bearbeitung:** 07.11.2016

**Geprüft:** Dr. Günter GRUBER

**Freigabe ab:** 07.11.2016

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Zweck und Anwendungsbereich .....</b>	<b>v</b>
<b>2. Verantwortlichkeit .....</b>	<b>v</b>
<b>3. Arbeitsschutz und Prüfeinrichtungen.....</b>	<b>v</b>
<b>4. Vorgehensweise .....</b>	<b>vi</b>
4.1. Probenahme .....	vi
4.2. Konservierung der Proben.....	vii
4.3. Homogenisierung der Probe.....	viii
4.4. BSB <sub>5</sub> -Ermittlung.....	ix
4.5. Filtration der Zulaufproben .....	xiii
4.6. Filtration der Ablaufprobe .....	xvii
4.7. Bestimmung der CSB-Konzentration der homogenisierten Zulaufprobe und Ermittlung des CSB <sub>GES</sub> .....	xvii
4.8. Bestimmung der CSB-Konzentration der filtrierten Ablaufprobe und Ermittlung der CSB-S <sub>i</sub> -Fraktion.....	xx
4.9. Bestimmung der CSB-Konzentration der filtrierten Zulaufprobe und Ermittlung der CSB-S <sub>s</sub> -Fraktion .....	xxi
4.10. Bestimmung der CSB-X <sub>s</sub> -Fraktion .....	xxi
4.11. Bestimmung der X <sub>i</sub> -Fraktion .....	xxiv

## Abkürzungsverzeichnis

ARA	Abwasserreinigungsanlage
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
BSB <sup>∞</sup>	Gesamter biologischer Sauerstoffbedarf
BSB <sub>5</sub>	Biologischer Sauerstoffbedarf nach fünf Tagen
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSB <sub>GES</sub>	Gesamter chemischer Sauerstoffbedarf des Abwassers
S <sub>i</sub>	Gelöste inerte Fraktion des CSB
SOP	Verfahrensvorschrift (Standard Operating Procedure)
S <sub>s</sub>	Gelöste schnell abbaubare Fraktion des CSB
STOWA	Dutch Foundation for Applied Water Research
X <sub>i</sub>	Partikulär inerte Fraktion des CSB
X <sub>s</sub>	Partikulär langsam abbaubare Fraktion des CSB

## 1. Zweck und Anwendungsbereich

Diese SOP beschreibt die Vorgehensweise für die analytische Bestimmung der folgenden vier CSB-Fractionen am Standort der ARA Graz-Gössendorf:

- S<sub>s</sub>: Gelöste schnell abbaubare CSB-Fraktion
- X<sub>s</sub>: Partikulär langsam abbaubare CSB-Fraktion, wobei dabei nach der verwendeten Methode die (X<sub>s</sub>+X<sub>H</sub>)-Fraktion bestimmt wird.
- S<sub>i</sub>: Gelöste inerte CSB-Fraktion
- X<sub>i</sub>: Partikulär inerte CSB-Fraktion

## 2. Verantwortlichkeit

Zuständig für die Durchführung und Qualitätssicherung der Entnahme von Abwasserproben an der ARA-Graz ist der Verantwortliche für diesen Arbeitsbereich.

## 3. Arbeitsschutz und Prüfeinrichtungen

Für eine sichere und erfolgreiche Durchführung der beschriebenen Vorgehensweise werden folgende Prüfeinrichtungen und Arbeitsschutzeinrichtungen gebraucht:

- Schutzbrillen
- Laborbekleidung
- Handschuhe (Hygieneschutz)
- Festes Schuhwerk (Vorschrift der ARA Graz-Gössendorf)
- Sicherheitsweste (Vorschrift der ARA Graz-Gössendorf)
- 2 x 2-Liter Probengefäße mit passendem Trichter (Transportgefäße)
- Kühlbox mit Kühlpatronen (zur Konservierung der Probe)
- Gerät für die Homogenisierung der Proben
  - Becherglas (mindestens ein 3 L-Becherglas)
- pH-Wert-Messsonde
- Druckfiltrationsgerät mit dazugehörigen 0,45 µm- bzw. 0,1 µm-Membranfilterblättern (Zellulose-Nitrat-Filter bzw. TOC-freie Filter)
  - Gefäße zur Sammlung des Filtrats (mindestens 2 Stück 150 mL-Bechergläser)
  - Bürste bzw. optionales Werkzeug zum Reinigen des Filtrationsgeräts nach jedem Filtrationsschritt
- HACH-Set zur Bestimmung der CSB-Konzentrationen (Küvetten mit Reagenz, Heizblock, Spektralphotometer)

- Präzisionspipette (Für die Zugabe der Probe zum Reagenz)
- OxiTop IS 12-Set (Firma WTW) zur BSB-Ermittlung (Gefäße, Messköpfe, Gummiköcher, Controller, Magnetstäbe, Magnetrührer)
  - Überlaufmesskolben
  - Thermoschrank für das Halten einer konstanten Temperatur von 20 °C
  - Natriumhydroxid Plätzchen (9 Stück)
- Reinstwasser (2,5 L-Reinstwasser für das Vorwaschen der Filter, um ein Kohlenstoffbluten der Filter zu vermeiden)

## 4. Vorgehensweise

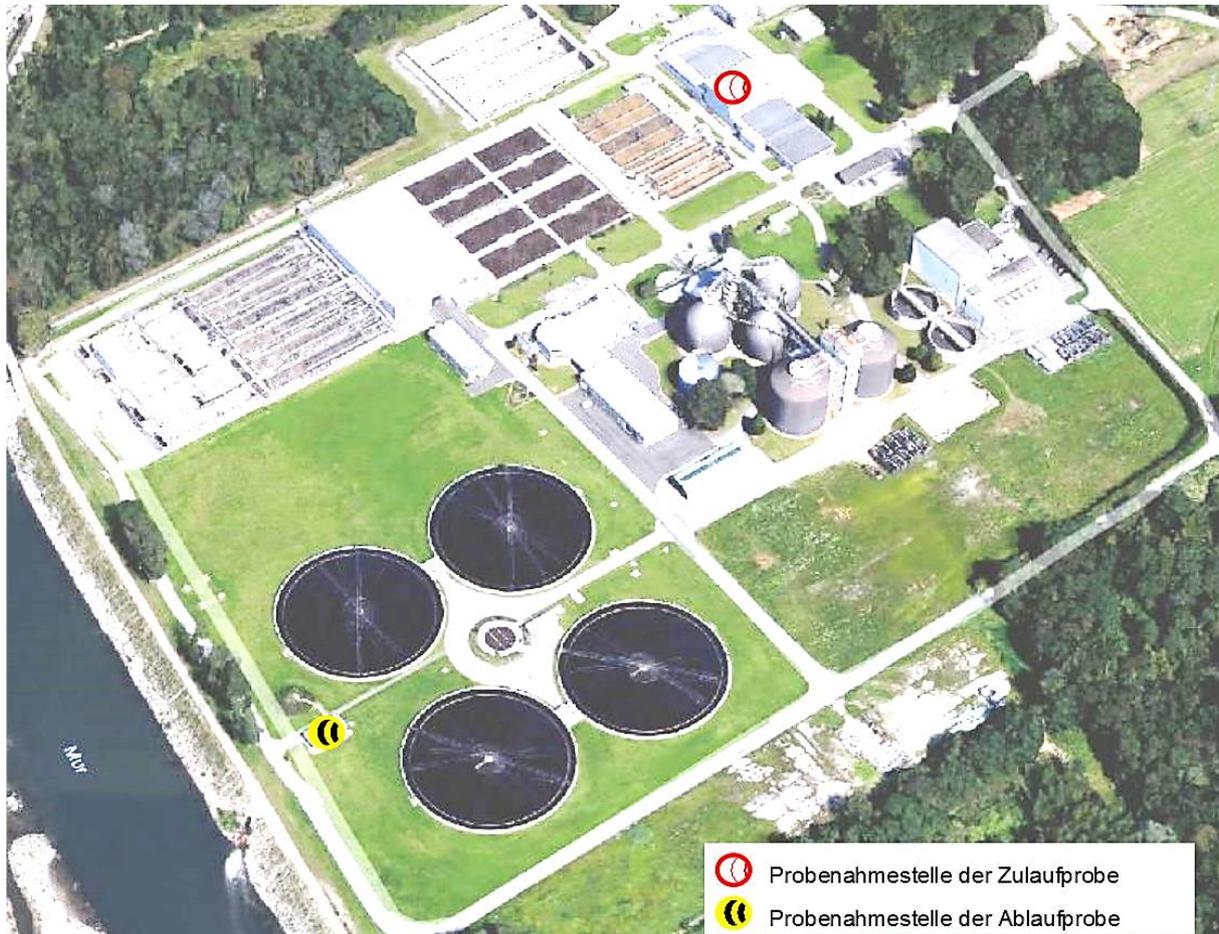
Sofern die Untersuchungen anhand von 24 h-Tagesmischproben durchgeführt werden sollen, empfiehlt sich eine synchrone Probenahme mit den betriebseigenen beiden automatischen Probenahmegeräten im Zu- und Ablauf der ARA Graz. Die diskontinuierlichen, volumenproportionalen Probenahmen dazu finden zumeist mit einer Parametrierung von 70 mL/550 m<sup>3</sup> während des Zeitraumes 07:15 – 07:15 statt. In Abstimmung mit dem Laborpersonal der ARA Graz kann die Probenahme auch mit den betriebseigenen beiden Probenahmegeräten durchgeführt werden. Dafür muss ev. das voreingestellte Teilprobenvolumen erhöht werden. Die Entnahme der Tageszu- und -ablaufprobe sollte unmittelbar nach dem Ende der Probenahmen (dzt. 07:15) für einen Tag stattfinden. Nach der Entnahme der Tagesmischproben sollten diese bei 4 °C gekühlt auf schnellstem Wege ins Labor des Institutes transportiert und mit den Laboranalysen begonnen werden, um einen Vorabbau der leicht abbaubaren Fraktionen möglichst zu verhindern. Bei der aktuellen Betriebsweise der ARA kann bei Trockenwetterbedingungen von einer durchschnittlichen Verweilzeit des Abwassers von 19 Stunden ausgegangen werden. Das bedeutet, dass die Entnahme der zugehörigen Ablaufprobe erst ca. 19 Stunden nach der Entnahme der Zulaufprobe stattfinden sollte. Nachdem diese Verzögerung von 19 Stunden mit der beschriebenen Vorgangsweise nicht exakt berücksichtigt werden kann, sollte diese auftretende Verzögerung zumindestens dadurch berücksichtigt werden, dass die zu den Zulaufproben korrespondierenden Ablaufproben erst jene des darauffolgenden Tages sein sollten. Bei Regenwetter verringern sich die Verweilzeiten und damit auch die Verzögerungen entsprechend den höheren Zulauftagesmengen. Auch für diesen Fall wird empfohlen, erst die Tags darauffolgenden Ablaufproben für die Bestimmung der CSB-Fraktionen zu verwenden.

Alle Schutzmaßnahmen der ARA wie auch die Laborvorschriften müssen bei der Probenahme berücksichtigt und eingehalten werden!

### 4.1. Probenahme

Abbildung 4-1 zeigt die beiden Stellen, an denen Tagesmischproben (Zulauf- und Ablaufprobe) dzt. gesammelt werden. Die Entnahme der Zulauf- bzw. Ablaufprobe erfolgt mittels stationären Probenahmegeräten im Besitz des Anlagenbetreibers der ARA

Graz-Gössendorf. Nach dem Ende der Teilprobenentnahme für eine Tagesmischprobe werden die befüllten Sammelgefäße aus dem Probenehmer geholt. Bevor die Abwasserprobe ins Transportgefäß (2-Liter Gefäß) gegossen wird, wird das Sammelgefäß leicht geschüttelt, um die Proben zu homogenisieren und einen ev. sedimentierten Bodensatz in den Sammelbehältern auch wieder homogen in Lösung zu bringen. Die Verwendung eines Trichters sorgt dafür, dass die Entnahme der Probe ohne Materialverlust erfolgt.



**Abbildung 4-1:** Probenahmestellen der Zulauf- beziehungsweise Ablaufprobe der ARA Graz-Gössendorf (maps.google.at, letzter Zugriff: 2016-07-31)

## 4.2. Konservierung der Proben

Das Transportgefäß muss aus einem Material bestehen, dessen Eigenschaften die chemischen und biologischen Vorgänge in den Abwasserproben nicht beeinflussen. Diesbezüglich muss das Gefäß auch über einen luftdichten Verschluss verfügen. Um Vorabbauprozesse schon während des Transports ins Institutslabor zu verhindern, sollten die Proben nach Möglichkeit bei 4 °C gekühlt in einer Kühlbox transportiert werden.

### 4.3. Homogenisierung der Probe

Da die Abwasserproben zugleich gelöste und ungelöste Stoffe enthalten, ist eine Homogenisierung der Zulauf- bzw. Ablaufprobe vor einer weiteren Behandlung unbedingt erforderlich. Die ganze Menge (2 Liter) der Abwasserprobe wird dafür mit einem Homogenisierungsgerät (Abbildung 4-2) kräftig durchgemischt und homogenisiert. Danach können alle weiteren Schritte der Analyse an den homogenisierten Proben durchgeführt werden.

Dabei wird der Kopf des Homogenisierungsgeräts (Typ: IKA ULTRA TURRAX T 50 DIGITAL) in das Gefäß mit der Ablauf- bzw. Zulaufprobe eingetaucht und das Gerät im Anschluss daran mit 10.000 Umdrehungen pro Minute aktiviert. Die Dauer der Homogenisierung beträgt ca. 1 Min/Liter.



**Abbildung 4-2:** Verwendetes Homogenisierungsgerät IKA ULTRA TURRAX T 50 DIGITAL

#### 4.4. BSB<sub>5</sub>-Ermittlung

Die manometrische Methode (OxiTop IS 12-Set, Fa. WTW) zur BSB<sub>5</sub>-Bestimmung der Firma WTW basiert auf manometrischen Druckmessungen in einem geschlossenen System. Aufgrund der besseren Anpassung der BSB-Kurve an die Regressionen wird im Rahmen dieser SOP jeweils eine dreifache BSB<sub>5</sub>-Bestimmung empfohlen und durchgeführt. Ein Beispiel eines OxiTop-Sets ist in Abbildung 4-3 zu sehen.



**Abbildung 4-3:** OxiTop-Set: 1) Controller, 2) Messkopf, 3) Gefäß, 4) Magnetrührer, 5) Gummiköcher, 6) Magnetstab (Produktflyer, modifiziert)

Für die Dreifach-Bestimmungen wird jeweils ein Probevolumen von min. 291 mL benötigt. Die homogenisierte Zulaufprobe wird in ein Gefäß gefüllt und zunächst der pH-Wert mit einer kalibrierten pH-Messsonde festgestellt. Da der ideale pH-Wert für die BSB-Bestimmung 7,0 beträgt, wird er entsprechend entweder mit Natronlauge (NaOH)

oder mit Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) genau auf 7,0 eingestellt. Die Zugabe der entsprechenden Chemikalie soll schrittweise in kleinen Mengen erfolgen, bis der pH-Wert richtig angepasst ist.

Sobald der pH-Wert richtig eingestellt wurde, wird das Versuchsvolumen der Probe festgelegt. Das Probenvolumen der homogenisierten Zulaufprobe ist dafür anhand der zu erwartenden BSB<sub>5</sub>-Werte aus der Tabelle 4-1 zu wählen. Normalerweise wird für den normal belasteten Zulauf einer ARA mit kommunalem Abwasser ein Probenvolumen von 97 mL gewählt.

**Tabelle 4-1:** Bestimmung des Probenvolumens und der Menge an ATH

Messbereich des BSB <sub>5</sub> (mg/L)	Probenvolumen (mL)	ATH (mL)
0-40	432	1,7
0-80	365	1,5
0-200	250	1,0
0-400	164	0,7
0-800	97	0,4
0-2000	43,5	0,2
0-4000	22,7	0,1

Die genaue Messung und Dosierung des Versuchsvolumens erfolgt mit einem Überlaufkolben, dessen Volumen mit dem Wert des Probenvolumens aus der Tabelle 4-1 übereinstimmt.

#### 4.4.1 Ansetzen der BSB-Flaschen mit Proben

Zuerst wird der Magnetstab ins OxiTop-Gefäß gegeben (Abbildung 4-3). Erst danach wird das mit einem Überlaufkolben genau abgemessene Probenvolumen dem Gefäß des OxiTop-Sets (Abbildung 4-3) ohne Materialverluste zugegeben. Im Anschluss daran wird der Probe noch ATH (Allylthioharnstoff) gemäß Tabelle 4-1 beigemischt. Dieser Stoff dient als Nitrifikationshemmer. Der Gummiköcher aus dem OxiTop-Set (Abbildung 4-3) wird in dem Oxi-Top-Gefäß (im Hals des Gefäßes) positioniert. Nachfolgend werden drei Plättchen des Natriumhydroxids in den Gummiköcher gegeben. Der Messkopf des OxiTop-Sets (Abbildung 4-3) wird abschließend luftdicht auf das OxiTop-Gefäß geschraubt.

#### 4.4.2 Startvorgang der BSB-Messungen

Danach wird der Controller des OxiTop-Sets (Abbildung 4-3) eingeschaltet. Hierfür wird die rechteckige Taste für „Kommunikation mit den Messköpfen“ betätigt. Mit den Pfeiltasten wird auf dem Bildschirm „Starten“ ausgewählt und mit der Taste „Runenter“ bestätigt. Anschließend kann mit den Pfeiltasten der Messbereich aus der Tabelle 4-1 ausgewählt und mit der „Runenter“-Taste jeweils bestätigt werden. Mit den Pfeiltasten wird eine neue „Identitätsnummer“ zugewiesen und wiederum mit der „Runenter“-Taste bestätigt. Diese Nummer soll für jedes Gefäß neu zugewiesen und notiert werden, weil sie als Verfolgungsnummer der jeweiligen Probe dient. Anschließend wird

der Infrarotsensor des Controllers (OxiTop-Set) zum Infrarotsensor des Messkopfs der behandelten Probe, wie in Abbildung 4-4 ersichtlich, in einer Entfernung von ca. 40 cm ausgerichtet. Nachdem der Controller ordnungsgemäß eingerichtet wurde, wird mit den Pfeiltasten „Starten“ ausgewählt und mit der „Runter“-Taste bestätigt. Der Controller soll, wie in Abbildung 4-4 dargestellt, ausgerichtet bleiben, bis auf dem Bildschirm des Controllers „Gestartet“ zu lesen ist. Zur gleichen Zeit sollte auf dem Messkopf die rote Diode aufleuchten. Damit ist die Vorbereitung eines OxiTop-Gefäßes abgeschlossen. Für jedes weitere Gefäß bzw. jede weitere Probe aus dem OxiTop-Set sind die Arbeitsschritte Schritte 4.4.1 - 4.4.2 zu wiederholen.



**Abbildung 4-4:** Ausrichtung des Controllers zum Messkopf während des Datentransfers

#### **4.4.3 Einstellen der Proben in den BSB-Schrank und Aktivieren der Magnetrührer**

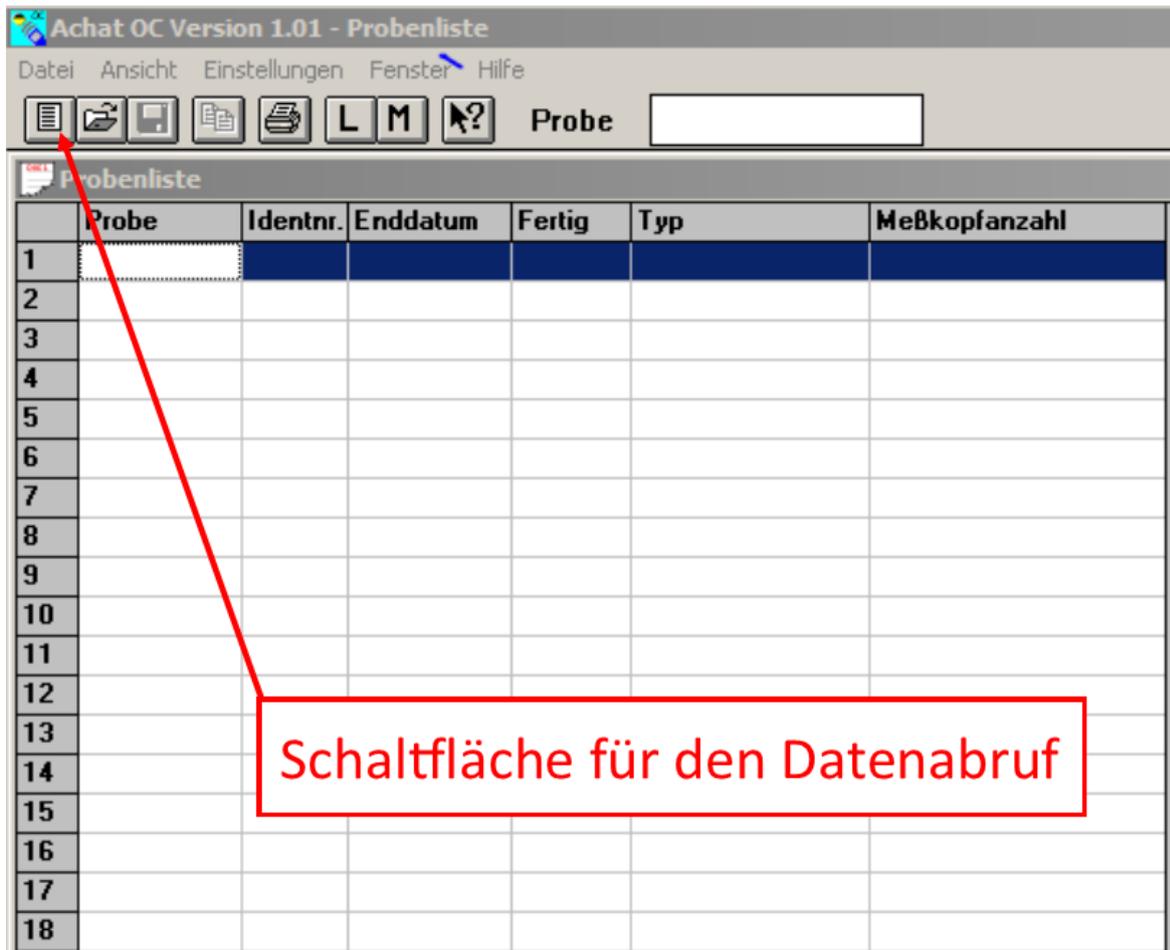
Nachdem alle OxiTop-Gefäße entsprechend vorbereitet und die BSB-Messungen gestartet wurden, müssen sie umgehend in den Thermoschrank gestellt werden. Die Temperatur im Schrank muss vom Anfang bis zum Ende der Messungen  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  betragen. Die OxiTop-Gefäße werden dafür auf die Magnetrührstellplätze in den Schrank gestellt. Für das fortwährende Rühren der Proben während der BSB-Bestimmungen muss das Netzteil des Magnetrührers angeschlossen und aktiviert werden und der Schrank für die nächsten fünf Tage oder bis zur nächsten Messung geschlossen bleiben.

#### **4.4.4 Ende der BSB-Messungen und Auslesen der Messdaten**

Nach fünf Tagen können die Ergebnisse der BSB<sub>5</sub>-Messungen ausgewertet werden. Dafür müssen die Messdaten von den Messköpfen an den Controller übertragen werden. Der Controller wird hierfür eingeschaltet und die rechteckige Taste für „Kommunikation mit den Messköpfen“ wird betätigt. Die Ablesung der Daten der Messköpfe erfolgt nicht stückweise wie bei der Vorbereitung bzw. dem Start der Messungen, sondern für mehrere Köpfe gleichzeitig. Darüber hinaus kann der Controller zugleich an mehreren Messköpfen, wie in Abbildung 4-4 ersichtlich ist, in einem Abstand von ca. 80-100 Zentimetern positioniert werden. Für das Übertragen der Messdaten muss mit den Pfeiltasten der Menüpunkt „Alle Daten abrufen“ ausgewählt und mit der „Runen-ter“-Taste bestätigt werden. Die rote Diode des jeweiligen Messkopfes leuchtet auf, wenn die Übertragung der Messdaten abgeschlossen ist.

#### **4.4.5 Übertragen der Messdaten vom Controller zum PC**

Um Daten vom OxiTop-Controller an den PC zu übertragen, wird das Gerät zuerst per AK 540/B-Kabel über die RS232-Schnittstelle mit dem PC verbunden. Als Übertragungsprogramm wird „ACHAT.EXE“ verwendet. Dieses Programm wurde ausschließlich für WTW-Anwendungen entwickelt. Mit Mausklick auf die Schaltfläche für den Datenabruf (Abbildung 4-5) des Programms wird eine Liste der Ergebnisse eines oder mehrerer Messköpfe generiert, sofern der Controller richtig mit dem PC verbunden ist. Jede dieser Listen enthält die Messdaten über den stündlichen BSB-Verbrauch in mg/L in den einzelnen OxiTop-Flaschen. Die Messergebnisse jeder Probe für 24, 48, 72, 96 und 120 Stunden werden geordnet und notiert. Da das OxiTop-Set als Zeiteinheit Minuten verwendet, werden diesbezüglich die BSB-Werte für 1440, 2880, 4320, 5760, und 7200 Minuten geordnet und notiert. Wichtig ist, zu erwähnen, dass nicht alle Ergebnisse der dreifachen Messung in weiter Folge verwendet wurden, sondern nur der Maximal- und Minimalstundenwert notiert wurden. Jede dieser Listen kann anschließend in einem \*.OXT-Format gespeichert und später in Microsoft Excel bearbeitet werden.



**Abbildung 4-5:** Das OxiTop-Interfaceprogramm ACHAT der Firma WTW für den Messdatentransfer vom Controller zum PC

#### 4.5. Filtration der Zulaufproben

Für die Filtration der homogenisierten Zulaufproben wird zunächst eine Druckfiltration mittels Edelstahl-druckfiltrationsgeräts verwendet (siehe Abbildung 4-6), dessen Druck 8 bar nicht überschreiten darf. Abbildung 4-6 zeigt die vier im Institutslabor vorhandenen Druckfiltrationseinheiten (vier Stahlzylinder), das Hauptabsperrventil und die Absperrventile der jeweiligen Zylinder. Der Zylinderverschluss, die Siebplatte, das Lochblech, der Dichtring und der Gerätunterteil (Abbildung 4-7) müssen vor jedem Druckvorgang gut abgewaschen und gereinigt werden, damit keine kohlenstoffhaltigen Überreste die nächste Messung beeinträchtigen können. Da die verwendeten Membranfilter ebenfalls Kohlenstoff enthalten können, der die Ergebnisse der Messungen beeinflussen kann, ist es ratsam, die verwendeten Membranfilter vor dem Filtrationsvorgang gründlich mit Reinstwasser zu reinigen. Auf diesen Schritt kann verzichtet werden, sofern explizit kohlenstofffreie Filter zur Verfügung stehen.

**WICHTIG:** Geräte, die mit einem hohen Druck betrieben werden, müssen unter permanenter Aufsicht des bedienenden Laboranten sein!

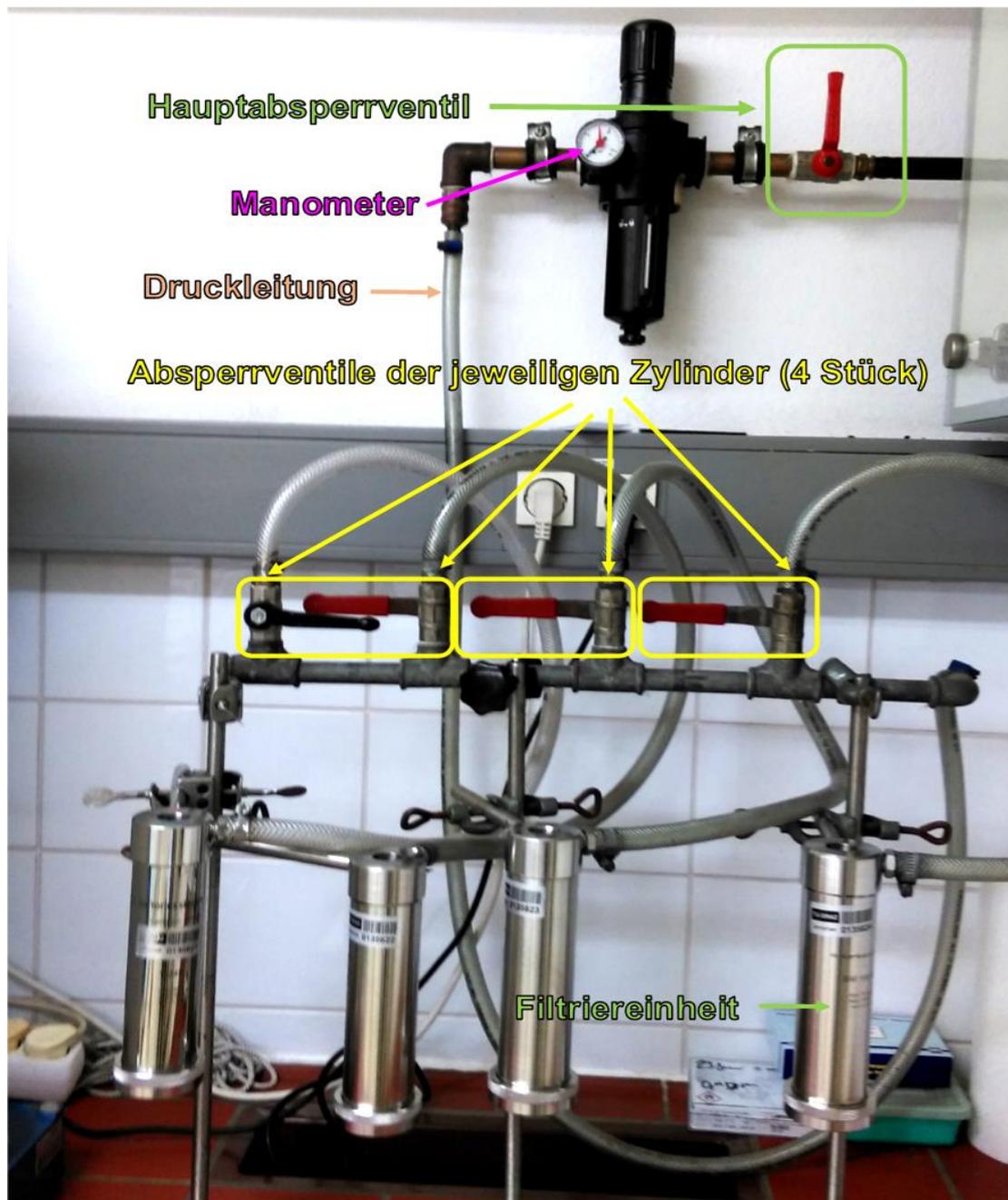


Abbildung 4-6: Die vier Druckfiltrationszylinder, das Hauptabsperrventil und vier Sperrventile der jeweiligen Zylinder im Labor des Instituts.



Abbildung 4-7: Vier Paare Unterbau-Schraubverschlüsse zur Aufnahme der Lochbleche, der Siebe, der Filter (nicht dargestellt) und der Dichtringe sowie die vier Zylinderverschlüsse zum Verschließen der Druckfiltrationsgeräte (von unten nach oben aufgelistet)

#### 4.5.1 Vorreinigung der verwendeten 0,45 µm-Membranfilter

Zu Beginn des Versuchs muss sichergestellt werden, dass das Hauptabsperrenteil (Abbildung 4-6) und die separaten Absperrventile der jeweiligen Zylinder alle verschlossen sind. Auf einem vorgewaschenen und getrockneten Filtrationszylinder wird der Unterbau-Schraubverschluss mit eingesetztem 0,45 µm-Membranfilter und allen sonstigen Bestandteilen (siehe Abbildung 4-6) fest angeschraubt. Die Reihenfolge der Einzelteile von unten nach oben ist: Unterbau-Schraubverschluss, Lochblech, Sieb, Filter, Dichtring. Der Druckzylinder wird zunächst zur Vorreinigung des Filtermaterials mit 200 mL Reinstwasser angefüllt und der Zylinderverschluss an der Zylinderoberseite fest verschraubt. Unterhalb der Filtrationseinheit wird zur Aufnahme des Filtrates ein Gefäß positioniert. Das Hauptabsperrenteil kann nun geöffnet werden. Das separate Absperrventil jedes einzelnen Zylinders (Abbildung 4-6) darf jetzt allmählich und sehr vorsichtig geöffnet werden, damit durch ein plötzliches Öffnen der Ventile nicht die Membranfilter beschädigt werden. Sobald sich die 200 mL Reinstwasser zum Vorreinigen der verwendeten Filter im Sammelgefäß befinden, ist der Filtervorreinigungsprozess abgeschlossen. Der Inhalt des Sammelgefäßes kann entsorgt werden, da er für keine weiteren Versuche mehr verwendet wird. Anschließend können die separaten Absperrventile der 4 Zylinder wieder verschlossen und die oberen Zylinderverschlüsse wieder ganz langsam geöffnet werden, damit der Überdruck aus den Zylindern langsam entweichen kann.

#### **4.5.2 Durchführung der 0,45 µm-Membranfiltration**

Der Druckzylinder wird mit 100 mL einer homogenisierten Probe aus dem Zulauf der ARA befüllt. Danach wird der obere Zylinderverschluss fest verschraubt. Zur Aufnahme des Filtrats wird ein gründlich gereinigter und getrockneter Messbecher unter den Filtrationszylinder gestellt. Das separate Absperrventil des Zylinders darf danach allmählich geöffnet werden. Sobald sich die 100 mL Probenvolumen im Sammelgefäß befinden, ist der erste Filtrationsschritt abgeschlossen. Das gewonnene Filtrat wird im Messbecher aufbewahrt, da es in den folgenden Versuchen verwendet wird. Danach kann das separate Absperrventil wieder geschlossen und hierauf der Zylinderverschluss wieder langsam geöffnet und abgeschraubt werden, damit der Überdruck aus dem Zylinder wieder allmählich entweichen und die Filtrationseinheit für die nächste Filtration vorbereitet werden kann.

#### **4.5.3 Reinigung der Filtrationseinheit**

Alle Druckzylinderteile (Zylinderverschlüsse, Siebplatte, Lochblech, Geräteunterteil und das Zylinderinnere), welche mit der Probe in Kontakt gekommen sind, müssen nach jedem Filtrationsvorgang sorgfältig gewaschen, gereinigt und getrocknet werden.

#### **4.5.4 Vorreinigung der verwendeten 0,1 µm-Membranfilter**

Auf ein gründlich vorgereinigtes und getrocknetes Gerät wird der Geräteunterteil mit eingesetztem 0,1 µm-Membranfilter und allen dazugehörigen Bestandteilen fest angeschraubt. Der Druckzylinder wird mit 200 mL Reinstwasser befüllt und der obere Zylinderverschluss fest angeschraubt. Unterhalb der Filtrationseinheit wird zur Aufnahme des Filtrates ein Gefäß positioniert. Das separate Absperrventil des Druckzylinders kann nun allmählich geöffnet werden. Sobald sich die 200 mL Reinstwasser zum Vorreinigen der verwendeten Filter im Sammelgefäß befinden, ist der Filtervorreinigungsprozess abgeschlossen. Der Inhalt des Sammelgefäßes kann entsorgt werden, da er für keine weiteren Versuche mehr verwendet wird. Anschließend kann das separate Absperrventil wieder verschlossen und der obere Zylinderverschluss ganz langsam geöffnet werden, damit der Überdruck aus dem Zylinder wieder langsam entweichen kann.

#### **4.5.5 Durchführung der 0,1 µm-Membranfiltration**

Der Druckzylinder wird mit den 100 mL der mit 0,45 µm filtrierte Probe aus dem Arbeitsschritt 4.5.2 befüllt. Danach wird der obere Zylinderverschluss fest verschraubt. Zur Aufnahme des Filtrats wird ein gründlich gereinigter und getrockneter Messbecher unter den Filtrationszylinder gestellt. Das separate Absperrventil des Zylinders darf danach allmählich geöffnet werden. Sobald sich die 100 mL Probenvolumen im Sammelgefäß befinden, ist der erste Filtrationsschritt abgeschlossen. Das gewonnene Filtrat wird im Messbecher aufbewahrt, da es in den folgenden Versuchen verwendet wird. Danach kann das separate Absperrventil wieder geschlossen und hierauf der Zylinder

dersverschluss wieder langsam geöffnet und abgeschraubt werden, damit der Überdruck aus dem Zylinder wieder allmählich entweichen und die Filtrationseinheit für die nächste Filtration vorbereitet werden kann.

#### **4.6. Filtration der Ablaufprobe**

Um die Filtration der Ablaufprobe durchzuführen, sind die Arbeitsschritte von 4.5.1 bis 4.5.5 mit der homogenisierten Ablaufprobe zu wiederholen.

#### **4.7. Bestimmung der CSB-Konzentration der homogenisierten Zulaufprobe und Ermittlung des CSB<sub>GES</sub>**

Für die CSB-Bestimmungen kann entweder die konventionelle und genormte Methode nach ÖNORM-M 6265 oder ein CSB-Küvettest verwendet werden. Aufgrund des geringeren Zeitaufwandes und der deutlich geringeren Kosten wird die Verwendung der HACH-Küvettest mit Schnellaufschluss empfohlen. Zur Abschätzung der auftretenden Unsicherheiten werden die CSB-Bestimmungen damit jeweils dreifach durchgeführt.

Das am Institut vorhandene Bestimmungs-Set der Firma „HACH“ besteht aus den folgenden Teilen:

- Spektralphotometer DR 2800
- Heizblock HAT 200 S
- Küvetten mit Reagenz zur CSB-Bestimmung

##### **4.7.1 Abschätzung des zu erwartenden CSB-Bereiches**

Zunächst muss die CSB-Konzentration der homogenisierten Zulaufprobe abgeschätzt werden, da anhand dieser Schätzung der Messbereich der verwendeten Küvette ausgewählt werden muss. Dabei ist die Erfahrung des Laborpersonals bei der Schätzung des zu erwartenden CSB-Messbereiches unerlässlich. Dabei kann der CSB-Messbereich sehr oft anhand der Farbe der Proben abgeschätzt. Eine dunklere Farbe des Abwassers deutet darauf hin, dass das Abwasser stärker mit CSB belastet ist, während ein hellerer Farbton des Abwassers auf das Gegenteil hinweist.

##### **4.7.2 Befüllung und Vorbereitung der CSB-Küvetten für den Aufschluss**

Nachdem der Messbereich für die CSB-Bestimmung ausgewählt wurde, wird eine Küvette für den geschätzten Messbereich aus der Packung entnommen und geschüttelt. Der Deckel der Küvette wird entsprechend markiert und beschriftet und danach abgeschraubt. Die Markierung hilft bei der Identifikation und Behandlung mehrerer parallel untersuchter Proben. Mit einer Präzisionspipette wird die an der Küvetten-Packung angegebene Menge der Probe in die Küvette zugegeben. Dies sollte ohne jeglichen Probenverlust erfolgen. Nach der Zugabe der Probe zum Reagenz sollte die Küvette mit dem zugehörigen markierten Verschluss fest verschlossen werden. Für

eine möglichst gute Durchmischung der Probe mit dem Reagenz wird die gut verschlossene Küvette hierauf kräftig geschüttelt. Für eine bessere und vor allem gleichmäßigere und vom Laboranten unabhängige Durchmischung der Probe mit dem Reagenz kann dafür optional auch ein Rüttelgerät verwendet werden. Die Küvette wird dabei oben kräftig gehalten (Abbildung 4-8), während der untere Teil der Küvette vom Gerät gleichmäßig geschüttelt wird. Damit ist der Vorbereitungsschritt einer Küvette abgeschlossen. Für jede weitere Küvette sind die Arbeitsschritte 4.7.1 - 4.7.2 zu wiederholen.



**Abbildung 4-8:** Rüttelgerät (Produktflyer)

### **4.7.3 Chemischer Hochtemperatur-Aufschluss der CSB-Küvetten**

Nach dem eine möglichst homogene Durchmischung der Proben mit dem Reagenz abgeschlossen ist, werden die Küvetteninhalte im „Heizblock-HAT-200-S“ (Abbildung 4-9) chemisch aufgeschlossen. Dafür sind der Heizblock zunächst einzuschalten, die Küvetten in den Heizblock einzuführen und der Deckel des Blocks zu schließen. Danach kann das „HT“-Programm per Knopfdruck auf dem Bildschirm des Geräts ausgewählt und gestartet werden.

Das „HT“-Programm dauert 15 Minuten. Nach Ablauf dieser Zeit wird jede Küvette noch einmal mit dem Rüttelgerät behandelt. Abschließend soll die Probe und noch vor der eigentlichen photometrischen CSB-Bestimmung für 30 bis 60 Minuten zum Abkühlen und Absetzen ruhen.



Abbildung 4-9: Verwendeter Heizblock zum chemischen Aufschließen der CSB-Küvetten mit geöffnetem und geschlossenem Deckel (Produktflyer der Fa. HACH))

#### 4.7.4 Photometrische Bestimmung der CSB-Konzentrationen

Nach dem chemischen Hochtemperatur-Aufschluss im Heizblock und dem Abkühlen der Küvetten werden die Küvetten mittels Spektralphotometer-DR-2800, wie in Abbildung 4-10 gezeigt, photometrisch vermessen und damit die enthaltenen CSB-Konzentrationen in den Proben bestimmt. Davor werden die Glasoberflächen der Küvetten noch mit einem Tuch gründlich gereinigt, da ev. Glasverunreinigungen die Messergebnisse beeinflussen können. Das Spektralphotometer muss dafür nur eingeschaltet und die Küvetten in das Photometer eingeführt werden. Anhand des auf den Küvetten enthaltenen und vom Photometer automatisch ausgelesenen Strichcodes erfolgt die Messung und Anzeige des Messergebnisses vollautomatisch.



Abbildung 4-10: Spektralphotometer (Produktflyer der Fa. HACH)

#### 4.7.5 CSB<sub>GES</sub>-Bestimmung der Zulaufproben

Die CSB-Konzentration der homogenisierten Zulauf-Probe wird an dieser Stelle vom Bildschirm des Spektralphotometers abgelesen und notiert. Dieser Wert gibt die gesamte CSB-Konzentration des Abwassers an (CSB<sub>GES</sub> [mg/L]). Für alle weiteren CSB-Bestimmungen sind die Arbeitsschritte 4.7.4 bis 4.7.5 entsprechend zu wiederholen.

#### 4.8. Bestimmung der CSB-Konzentration der filtrierten Ablaufprobe und Ermittlung der CSB-S<sub>i</sub>-Fraktion

##### 4.8.1 CSB-Bestimmung der doppelt filtrierten Ablaufprobe

Um die Konzentration des CSB der filtrierten Ablaufprobe zu bestimmen, sind die Arbeitsschritte 4.7.1 bis 4.7.4 entsprechend zu wiederholen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass anstatt der homogenisierten Zulaufprobe jetzt dafür die doppelt filtrierte und im Kapitel 4.6 beschriebene Ablaufprobe verwendet werden muss.

##### 4.8.2 Ermittlung der CSB-S<sub>i</sub>-Fraktion

Der im vorangegangenen Abschnitt 4.8.1 ermittelte CSB-Wert gibt die Konzentration der gelöst inerten Fraktion des CSB im Abwasser an (CSB<sub>ABL,FILT,0.1</sub> [mg/L]). Aufgrund des Vorhandenseins auch einer schnell abbaubaren Fraktion im Ablauf der ARA, muss noch ein Korrekturfaktor von 0,9 berücksichtigt werden. Damit lässt sich die S<sub>i</sub>-Fraktion mittels der folgenden Formel berechnen:

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit:

*S<sub>i</sub> ... gelöst inerte CSB (mg/L), CSB<sub>ABL,FILT,0.1</sub> ... CSB Konzentration des 0,1 µm-Filtrats aus dem Ablauf der ARA (mg/L)*

## 4.9. Bestimmung der CSB-Konzentration der filtrierten Zulaufprobe und Ermittlung der CSB-S<sub>s</sub>-Fraktion

### 4.9.1 CSB-Bestimmung der doppelt filtrierten Zulaufprobe

Um die Konzentration des CSB der filtrierten Zulaufprobe zu bestimmen, sind die Arbeitsschritte 4.7.1 bis 4.7.4 entsprechend zu wiederholen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass anstatt der homogenisierten Zulaufprobe jetzt dafür die doppelt filtrierte und im Kapitel 4.5 beschriebene Zulaufprobe verwendet werden muss. Daraus ergibt sich die für die Ermittlung der CSB-S<sub>s</sub>-Fraktion erforderliche Summe der schnell abbaubaren und inert gelösten Fraktionen des CSB ( $CSB_{ZUL,FILT,0.1}$  in [mg/L]).

### 4.9.2 Ermittlung der CSB-S<sub>s</sub>-Fraktion

Da  $S_i$  aus dem Abschnitt 4.8.2 bereits bekannt ist und die Summe der gelösten Fraktionen aus dem Abschnitt 4.9.2, lässt sich die schnell abbaubare Fraktion aus der Differenz der beiden gelösten Fraktionen und der inert gelösten Fraktionen ermitteln:

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i \quad \text{Gleichung 4-2}$$

mit:

$S_i$  ... gelöst inerte CSB (mg/L),  $CSB_{ZUL,FILT,0.1}$  ... CSB Konzentration des 0,1 µm-Filtrats aus dem Zulauf der ARA bzw. ( $S_i + S_s$ ) (mg/L),  $S_s$  ... gelöst schnell abbaubarer CSB (mg/L)

## 4.10. Bestimmung der CSB-X<sub>s</sub>-Fraktion

Dieses Verfahren stellt eine modifizierte Vorgehensweise der STOWA nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) dar. Zur Ermittlung dieser Fraktion werden die Ergebnisse der BSB<sub>5</sub>-Ermittlung (OxiTop) verwendet. Im weiteren Verlauf werden dafür keine Prüfvorrichtungen oder Labortätigkeiten zur Bestimmung dieser Fraktion gebraucht.

### 4.10.1 Ermittlung der BSB-Werte nach 1, 2, 3, 4 und 5 Tagen

Wie bereits erwähnt, werden die gemessenen BSB-Werte (mg/L) mit dem ACHAT-Programm (siehe Abschnitt 4.4.5) auf einen PC übertragen und in weiterer Folge nun zur Bestimmung des X<sub>s</sub> verwendet. Damit sind auch BSB-Werte nach den Tagen 1, 2, 3, 4 und 5 bekannt. Dafür sollte die von ACHAT generierte \*.OXT-ASCII-Ausgangsdatei (siehe Abbildung 4-11) am besten mit Microsoft Excel geöffnet werden und aus den alle 20 min aufgezeichneten BSB-Werten jene nach 1440, 2880, 4320, 5760 und 7200 Minuten herausgesucht und gespeichert werden. Für die weitere Berechnung werden nur die Mittelwerte der mit den Dreifachbestimmungen gemessenen Minimal- und Maximalwerte der täglichen BSB-Messungen verwendet.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
70	980.0	107.0											
71	1000.0	107.0											
72	1020.0	113.0											
73	1040.0	113.0											
74	1060.0	118.0											
75	1080.0	118.0											
76	1100.0	124.0											
77	1120.0	124.0											
78	1140.0	124.0											
79	1160.0	124.0											
80	1180.0	124.0											
81	1200.0	124.0											
82	1220.0	124.0											
83	1240.0	124.0											
84	1260.0	124.0											
85	1280.0	124.0											
86	1300.0	124.0											
87	1320.0	130.0											
88	1340.0	124.0											
89	1360.0	124.0											
90	1380.0	124.0											
91	1400.0	135.0											
92	1420.0	135.0											
93	1440.0	135.0											
94	1460.0	130.0											
95	1480.0	130.0											
96	1500.0	130.0											
97	1520.0	135.0											
98	1540.0	141.0											
99	1560.0	141.0											
100	1580.0	141.0											
101	1600.0	135.0											
102	1620.0	135.0											

Abbildung 4-11: Beispiel einer BSB-Ausgabedatei mit den alle 20 min fortlaufend aufgezeichneten BSB-Werten in Microsoft Excel

#### 4.10.2 Erstellung der 5 Gleichungen zur Berechnung von $BSB_{tot}$ auf Basis der BSB-Tageswerte nach 1, 2, 3, 4 und 5 Tagen

Zunächst wird eine leere Arbeitsmappe in Microsoft Excel oder einem beliebigen Tabellenkalkulationsprogramm erstellt. Die Zelle A1 wird für die Konstante erster Ordnung ( $K_{BSB}$ ) reserviert und frei gelassen.

Anschließend werden 5 Gleichungen für die Berechnung von  $BSB_{tot}$  auf Basis der BSB-Messwerte nach 1, 2, 3, 4 und 5 Tagen 5 Zellen (Abbildung 4-12) zugewiesen. Dabei berechnet jede der 5 Gleichungen den  $BSB_{tot}$  auf Basis der BSB-Messwerte. Gleichung 1 beispielsweise auf Basis des BSB-1440-Minuten-Wertes nach 1 Tag, Gleichung 2 auf Basis des BSB-2880-Minuten-Wertes nach 2 Tagen, Gleichung 3 auf Basis des BSB-4320-Minuten-Wertes nach 3 Tagen, Gleichung 4 auf Basis des BSB-5760-Minuten-Wertes nach 4 Tagen und Gleichung 5 auf Basis des BSB-7200-Minuten-Wertes nach 5 Tagen.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	$k_{BSB}$							
2								
3	GLEICHUNG 1							
4	GLEICHUNG 2							
5	GLEICHUNG 3							
6	GLEICHUNG 4							
7	GLEICHUNG 5							
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								

Abbildung 4-12: Erstellung der 5 Gleichungen für die Berechnung von  $BSB_{tot}$

Die Gleichungen werden wie in Abbildung 4-13 eingegeben. Dabei werden die zuvor im Abschnitt 4.10.1 gespeicherten Tageswerte (mg/L) nach 1, 2, 3, 4 und 5 Tagen der BSB-Messung (OxiTop) eingesetzt. Die BSB-Werte in Abbildung 4-13 sollen den Mittelwerten des gemessenen Minimums und Maximums der zugehörigen Probe für den jeweiligen Tag entsprechen (Kapitel 4.4.5).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	$k_{BSB}$							
2								
3	$=1/(1-EXP(-A1*1))*(BSB1440)$							
4	$=1/(1-EXP(-A1*2))*(BSB2880)$							
5	$=1/(1-EXP(-A1*3))*(BSB4320)$							
6	$=1/(1-EXP(-A1*4))*(BSB5760)$							
7	$=1/(1-EXP(-A1*5))*(BSB7200)$							
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								

Der Wert „BSB1440“ entspricht dem Mittelwert des Maximums und des Minimums der BSB-Messung (OxiTop) für die Zeit der 1440 Minuten der zugehörigen Probe.

Abbildung 4-13: Eingabe der 5 Gleichungen für die Berechnung von  $BSB_{tot}$  auf Basis der BSB-Werte nach 1, 2, 3, 4 und 5 Tagen

#### 4.10.3 Ermittlung des $k_{BSB}$ -Konstante, des $BSB^\infty$ und des $CSB-X_s$

Nachdem die Erstellung der 5 Gleichungen abgeschlossen wurde, kann mit der manuellen Iteration der Zelle A1 ( $k_{BSB}$ -Konstante erster Ordnung) begonnen werden. Die Konstante  $k_{BSB}$  ist einheitenlos und variiert laut STOWA nach Roeleveld & Loosdrecht (2002) zwischen 0,15 und 0,8 [-]. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Masterarbeit ergaben für das Grazer Abwasser Werte zwischen 0,39 und 0,66 [-].

Bei der manuellen Iteration wird die  $k_{BSB}$ -Konstante beginnend bei 0,15 in die Zelle A1 eingetragen und iterativ bis 0,8 vergrößert und zwar solange bis das Berechnungsergebnis für  $BSB_{tot}$  bei allen fünf Gleichungen (Abbildung 4-3) weitestgehend identisch ist. Die erzielbare Genauigkeit beschränkt sich dabei auf ganze Zahlen für  $BSB_{tot}$  und schließt keine Nachkommastellen ein. Das identische Ergebnis der 5 Gleichungen entspricht schließlich auch dem  $BSB_{tot}$  [mg/L] der zugehörigen Probe, der für die Ermittlung des  $BSB^\infty$  verwendet wird.

**OPTIONAL: Falls der Schritt 4.10.3 allein durch Iteration von  $k_{BSB}$  nicht gelingt, wird empfohlen die in den 5 Gleichungen verwendeten BSB-Tageswerte (Abbildung 4-13) innerhalb gewisser Bandbreiten zu variieren (z. B. zwischen dem minimalen und maximalen Wert der Dreifach-Bestimmungen).**

Nachdem der  $BSB_{tot}$  mittels Regression ermittelt wurde, kann der gesamte biologische Sauerstoffbedarf ( $BSB^\infty$ ) mit der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$BSB^\infty = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} \quad \text{Gleichung 4-3}$$

mit:

$BSB^\infty$  ... gesamter biologischer Sauerstoffbedarf (mg/L),  $f_{BOD}$  ... Korrekturfaktor (-),  $BSB_{tot}$  ... mittels Regression approximierter Wert aus den BSB-Messungen (mg/L)

Der  $f_{BOD}$  ist ein Korrekturfaktor und darf zwischen 0,1 und 0,2 gewählt werden.

Sobald der  $BSB^\infty$  ermittelt wurde, kann der  $X_s$  aus der Differenz der leicht abbaubaren Fraktion und dem  $BSB^\infty$  mit Hilfe folgender Gleichung errechnet werden:

$$X_s = BSB^\infty - S_s \quad \text{Gleichung 4-4}$$

mit:

$X_s$  ... partikulär langsam abbaubarer CSB (mg/L),  $BSB^\infty$  ... gesamter biologischer Sauerstoffbedarf nach Roeleveld & Loosdrecht(2002) (mg/L),  $S_s$  ... schnell abbaubarer CSB

#### 4.11. Bestimmung der $X_i$ -Fraktion

Da die  $X_i$ -Fraktion als einzige Unbekannte der betrachteten CSB-Fractionen übrig bleibt, lässt sie sich leicht aus der Differenz der restlichen Fraktionen vom  $CSB_{GES}$  (Kapitel 4.7) errechnen. Der partikulär inerte CSB wird daher mit der folgenden Gleichung ermittelt:

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i \quad \text{Gleichung 4-5}$$

mit:

$X_s$  ... partikulär langsam abbaubarer CSB (mg/L),  $CSB_{GES}$  ... gesamter chemischer Sauerstoffbedarf,  $S_s$  ... schnell abbaubarer CSB,  $S_i$  ... gelöst inerte CSB (mg/L),  $X_i$  ... partikulär inerte CSB (mg/L)

**Mit der Beendigung dieses Schrittes sind alle gesuchten CSB-Fractionen ermittelt worden!**

## **Anhang B**

### **Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)**

## **CSB-Messungen**

### **Ergebnisse der 15-tägigen Messkampagne an der ARA Graz-Gössendorf**

durchgeführt vom 26.06.2016 bis zum 11.07.2016

am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der  
Technischen Universität Graz

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 26.06.2016 - 27.06.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	579	579	579	<b>579</b>	-	-	-	-
		579	579	579	<b>579</b>	-	-	-	-
		612	613	613	<b>613</b>	-	-	-	-
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	95,7	95,8	95,8	<b>96</b>	-	-	-	-
		94,9	94,9	94,9	<b>95</b>	-	-	-	-
		93,4	93,6	93,4	<b>93</b>	-	-	-	-
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	87	87	86,9	<b>87</b>	-	-	-	-
		88,2	88,2	88	<b>88</b>	-	-	-	-
		89,7	89,8	89,6	<b>90</b>	-	-	-	-
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	344			<b>344</b>	-			-
		344				-			
		338				-			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	272	272	270	<b>271</b>	-	-	-	-
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	<b>0</b>	-	-	-	-

Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 27.06.2016 - 28.06.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	564	564	563	564	37,3	37,2	37,3	37,3
		549	549	549	549	39,2	39,1	39,1	39,1
		555	555	557	556	37,1	36,6	36,8	36,8
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	87,3	87,4	87,4	87	18,8	18,8	18,9	18,8
		86,4	86,5	86,3	86	19,1	19,4	19,1	19,2
		85,9	86	86	86	19,5	19,5	19,3	19,4
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	79,2	79,3	79,2	79	18,4	18,3	18,6	18,4
		76,2	76,3	76,2	76	18,2	17,9	18,2	18,1
		79,6	79,5	79,5	80	17,5	17,9	17,6	17,7
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	315			315	16			16
		321				15,7			
		310				15,2			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	234	236	236	235	15	15	16	15
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 28.06.2016 - 29.06.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	843	843	843	843	29,8	29,5	29,8	29,7
		824	824	824	824	30,4	30,6	60,4	40,5
		826	825	826	826	29,6	30,1	29,7	29,8
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	163	163	163	163	21,9	21,7	21,3	21,6
		161	161	161	161	20,6	20,8	20,6	20,7
		162	162	162	162	21,2	21,3	21,1	21,2
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	156	156	156	156	20,2	20,7	20,3	20,4
		155	155	155	155	18,9	19	18,8	18,9
		156	156	156	156	19,7	19,6	19,8	19,7
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	541			537	12,1			11
		541				10,1			
		530				11,2			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	438	440	440	439	11	11	11	11
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 29.06.2016 - 30.06.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	698	694	696	696	25,6	25,8	25,5	25,6
		690	690	690	690	24,8	24,4	24,6	24,6
		711	711	711	711	25	25,3	25,1	25,1
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	156	156	156	156	18,3	17,9	18,2	18,1
		155	155	155	155	17,9	18	18	18,0
		156	156	156	156	18	18,2	18	18,1
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	132	132	132	132	16,6	17,2	17	16,9
		135	135	135	135	18,3	18	18,3	18,2
		136	136	136	136	18,1	18,3	18	18,1
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	428			434	10,7			11
		428				11,5			
		445				11,5			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	312	318	316	315	4	5	4	4
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 30.06.2016 - 01.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	598	598	598	598	27,9	27,8	27,9	27,9
		606	606	606	606	26,2	26	26,2	26,1
		600	601	601	601	28,7	28,6	28,7	28,7
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	131	131	131	131	19,7	19,8	19,6	19,7
		133	133	133	133	16,3	16,9	16,4	16,5
		128	128	128	128	17	17	17	17,0
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	112	112	112	112	16,5	16,8	16,6	16,6
		113	113	113	113	17,2	17,1	17,3	17,2
		114	114	114	114	17,1	17,5	17,1	17,2
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	315			311	9			9
		315				9,3			
		304				8,1			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	290	280	286	285	9	6	9	8
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 01.07.2016 - 02.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	537	537	537	537	17,5	18	17,6	17,7
		563	564	563	563	16,8	16,6	16,6	16,7
		587	586	587	587	17,9	18	17,9	17,9
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	119	119	119	119	15,1	15,4	15,5	15,3
		114	114	114	114	14,8	15,1	15	15,0
		117	117	117	117	15	14,8	15,3	15,0
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	97,9	98	97,9	98	14,4	14,9	14,5	14,6
		97,1	97	97,1	97	14,7	14,2	14,5	14,5
		98,8	98,9	98,8	99	14,5	14,7	14,5	14,6
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	287			287	5,6			6,0
		287				5,9			
						6,5			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	258	258	260	259	0	2	2	1,3
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 02.07.2016 - 03.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	516	516	516	516	22,8	22,8	23	22,9
		518	517	517	517	22,5	22,8	22,5	22,6
		501	501	501	501	23,4	23,3	23,6	23,4
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	88,3	88,2	88,3	88	18,1	17,9	17,5	17,8
		88,4	88,5	88,5	88	17,1	16,5	17	16,9
		88,5	88,5	88,5	89	16,3	15,6	16,7	16,2
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	80,3	80,3	80,2	80	16,3	17	16,5	16,6
		81	81	81	81	16,9	16,8	16,5	16,7
		81	81	81	81	16,8	16,8	16,4	16,7
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	310			310	8,1			7,9
		310				7,6			
		310				8,1			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	228	246	258	244	5	4	4	4,3
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 03.07.2016 - 04.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	540	540	540	540	27,1	27	27,1	27,1
		529	530	530	530	22,2	22,8	21,9	22,3
		536	536	535	536	22,9	22,9	22,3	22,7
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	106	106	106	106	15,8	16,2	15,7	15,9
		103	103	103	103	15,9	15,7	15,8	15,8
		103	102	102	102	15,7	15,4	15,8	15,6
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	98,2	98,3	98,3	98	16,7	16,5	17	16,7
		98,1	98,1	98,1	98	16,3	16,8	16,6	16,6
		96,2	96,2	96,3	96	16,6	16,7	16,8	16,7
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	327			321	11,8			13
		327				12,9			
		310				13,8			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	294	300	298	297	5	5	6	5
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 04.07.2016 -05.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	671	671	670	671	27,4	27,1	27,5	27,3
		685	685	685	685	26,2	26,3	26,6	26,4
		669	669	669	669	26,7	26,8	26,6	26,7
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	131	131	131	131	16,8	17	16,6	16,8
		128	128	128	128	15,8	16,6	16,5	16,3
		128	128	128	128	17,2	16,9	17,3	17,1
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	122	122	122	122	18,4	17,8	17,5	17,9
		121	121	121	121	17,4	17,6	17,1	17,4
		120	120	120	120	17,8	17,8	17,7	17,8
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	445			432	14			14
		428				15,2			
		423				13,8			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	318	330	332	327	6	8	9	8
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 05.07.2016 - 06.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	638	638	638	638	22,9	23	22,6	22,8
		657	658	657	657	21,8	21,2	21,8	21,6
		635	636	635	635	21,4	21,7	21,4	21,5
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	118	118	118	118	17,2	16,7	17,1	17,0
		117	117	117	117	17,4	17,5	17,3	17,4
		117	117	117	117	16,8	16,5	16,5	16,6
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	111	111	111	111	16,1	16,7	16,2	16,3
		110	110	110	110	16,2	16,1	16,2	16,2
		107	108	107	107	15,9	16	15,9	15,9
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	383			383	10,1			10
		389				10,1			
		377				9,5			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	302	304	310	305	2	3	3	3
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 06.07.2016 - 07.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	774	774	774	774	21,1	21,2	21,2	21,2
		757	757	758	757	20,1	21,1	20,6	20,6
		756	757	757	757	20,7	20,8	20,7	20,7
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	149	148	148	148	17,7	17,7	17,5	17,6
		150	150	150	150	17,7	17,9	17,8	17,8
		150	150	150	150	17,6	17,6	17,6	17,6
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	140	139	140	140	17,4	17,5	17,4	17,4
		140	140	140	140	17,1	17,3	17,3	17,2
		142	142	142	142	17,6	17,5	17,5	17,5
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	479			468	7,9			8
		462				7,9			
		462				8,4			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	336	342	346	341	1	2	2	2
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 07.07.2016 - 08.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	756	756	756	756	23,2	23,4	23,3	23,3
		725	725	724	725	23,7	23,9	23,7	23,8
		726	726	726	726	24,4	24,1	24,4	24,3
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	157	157	156	157	22,7	22,6	22,6	22,6
		158	158	158	158	23,6	23,7	23,5	23,6
		157	157	157	157	21,5	21,3	21,5	21,4
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	162	162	162	162	24	24,3	24,3	24,2
		159	159	159	159	24,4	24,4	24,5	24,4
		167	167	167	167	25,7	25,4	25,6	25,6
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	462			456	6,7			7
		462				7,6			
		445				7,3			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	270	282	286	279	5	6	5	5
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 08.07.2016 - 09.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	640	639	640	640	31,6	31,5	31	31,4
		643	643	642	643	30,4	30,1	30,4	30,3
		650	650	650	650	29,8	29,9	29,8	29,8
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	151	151	151	151	19	19,5	19,4	19,3
		151	151	151	151	19,3	19,4	19,5	19,4
		149	149	149	149	18,9	19	18,9	18,9
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	150	150	150	150	23,4	23,5	23,4	23,4
		150	149	150	150	22	22	22,2	22,1
		153	153	153	153	22,5	22,5	22,5	22,5
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	361			359	10,1			10
		355				10,7			
		361				10,1			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	286	298	300	295	12	12	12	12
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 09.07.2016 - 10.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	610	610	609	610	25	25	25	25,0
		619	619	619	619	25,7	25,4	25,8	25,6
		595	595	595	595	27	26,9	26,9	26,9
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	141	141	141	141	19,3	19,7	19,9	19,6
		142	142	142	142	20	19,8	20	19,9
		142	141	142	142	19,5	19,3	19,5	19,4
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	130	130	130	130	25,8	25,5	25,7	25,7
		130	130	130	130	24,4	24,5	24,3	24,4
		130	130	130	130	24,7	24,4	24,7	24,6
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	338			345	11,5			12
		349				12,1			
		349				12,4			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	294	294	300	296	4	6	9	6
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Ergebnisse der CSB-Messungen (HACH)

Zulauf + Ablauf = 24 h-Tagesmischprobe vom 10.07.2016 - 11.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	640	640	640	640	22,7	22,6	22,8	22,7
		653	653	653	653	23,3	23,4	23,2	23,3
		645	642	643	643	23,6	23,8	23,8	23,7
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	111	111	111	111	18,4	18,6	18,4	18,5
		113	113	113	113	18,1	18	18	18,0
		112	112	112	112	18,4	18,5	18,5	18,5
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	108	108	108	108	25,7	25,5	25,7	25,6
		114	114	114	114	23,8	23,9	23,8	23,8
		115	115	115	115	23,9	24,1	24,1	24,0
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	394			383	10,1			10
		383				10,7			
		372				9,8			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	304	310	326	313	3	3	5	4
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0

Zulauf + Ablauf = 24 h Tagesmischprobe vom 11.07.2016 - 12.07.2016

Probe	Einheit	Zulauf	Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)	[mg/L]	- - -	-	23,1	23,2	23	23,1
		- - -	-	20,9	20,6	21,6	21,0
		- - -	-	21,7	21,9	21,6	21,7
CSB (0,45 µm membranfiltriert)	[mg/L]	- - -	-	18,7	18,9	18,9	18,8
		- - -	-	19,7	19,6	19	19,4
		- - -	-	20	20	19,6	19,9
CSB (0,1 µm membranfiltriert)	[mg/L]	- - -	-	27,2	27	27,2	27,1
		- - -	-	24,2	24,1	24,4	24,2
		- - -	-	27,4	27,7	27,5	27,5
BSB <sub>5</sub> (homogenisiert)	[mg/L]	-	-	6,2			7
		-	-	6,5			
		-	-	7			
TS (0,45 µm filtriert)	[mg/L]	- - -	-	3	3	2	3
TS (0,1 µm filtriert)	[mg/L]	- - -	-	0	0	0	0

## **Anhang C**

### **Ergebnisse der BSB<sub>5</sub>-Messungen (OxiTop)**

## **BSB<sub>5</sub>-Messungen (OxiTop)**

### **Ergebnisse der 15-tägigen Messkampagne an der ARA Graz-Gössendorf**

durchgeführt vom 26.06.2016 bis zum 11.07.2016

am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der  
Technischen Universität Graz

Ergebnisse der BSB5-Messungen (OxiTop)

<b>Mischprobe vom 26.06.2016 auf 27.06.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 27.06.2016		Startdatum: 27.06.2016		Startdatum: 27.06.2016	
Enddatum: 02.07.2016		Enddatum: 02.07.2016		Enddatum: 02.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 01413 0813		SN Nr.: 01414 0154		SN Nr.: 00006 0052	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	141	1440	152	1440	146
2880	231	2880	237	2880	225
4320	282	4320	282	4320	270
5760	315	5760	315	5760	310
7200	344	7200	344	7200	338

<b>Mischprobe vom 27.06.2016 auf 28.06.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 28.06.2016		Startdatum: 28.06.2016		Startdatum: 28.06.2016	
Enddatum: 03.07.2016		Enddatum: 03.07.2016		Enddatum: 03.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 00006 0054		SN Nr.: 01410 0438		SN Nr.: 00006 0058	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	135	1440	135	1440	130
2880	208	2880	225	2880	214
4320	259	4320	270	4320	265
5760	293	5760	299	5760	293
7200	315	7200	321	7200	310

<b>Mischprobe vom 28.06.2016 auf 29.06.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 29.06.2016		Startdatum: 29.06.2016		Startdatum: 29.06.2016	
Enddatum: 04.07.2016		Enddatum: 04.07.2016		Enddatum: 04.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 01419 0641		SN Nr.: 00006 0080		SN Nr.: 00006 0135	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	248	1440	242	1440	213
2880	400	2880	394	2880	383
4320	473	4320	468	4320	456
5760	513	5760	513	5760	501
7200	541	7200	541	7200	530

Ergebnisse der BSB5-Messungen (OxiTop)

<b>Mischprobe vom 29.06.2016 auf 30.06.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 30.06.2016		Startdatum: 30.06.2016		Startdatum: 30.06.2016	
Enddatum: 05.07.2016		Enddatum: 05.07.2016		Enddatum: 05.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 00216 0780		SN Nr.: 00216 0785		SN Nr.: 00216 0788	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	180	1440	180	1440	197
2880	293	2880	299	2880	332
4320	361	4320	361	4320	389
5760	400	5760	400	5760	423
7200	428	7200	428	7200	445

<b>Mischprobe vom 30.06.2016 auf 01.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 01.07.2016		Startdatum: 01.07.2016		Startdatum: 01.07.2016	
Enddatum: 06.07.2016		Enddatum: 06.07.2016		Enddatum: 06.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 002160808		SN Nr.: 004430356		SN Nr.: 004430375	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	135	1440	135	1440	130
2880	214	2880	203	2880	192
4320	254	4320	254	4320	248
5760	287	5760	287	5760	282
7200	315	7200	315	7200	304

<b>Mischprobe vom 01.07.2016 auf 02.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 02.07.2016		Startdatum: 02.07.2016		Startdatum: 02.07.2016	
Enddatum: 07.07.2016		Enddatum: 07.07.2016		Enddatum: 07.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 004460355		SN Nr.: 004480610		SN Nr.: -	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	118	1440	124	1440	-
2880	180	2880	186	2880	-
4320	231	4320	237	4320	-
5760	265	5760	265	5760	-
7200	287	7200	287	7200	-

Ergebnisse der BSB5-Messungen (OxiTop)

<b>Mischprobe vom 02.07.2016 auf 03.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 03.07.2016		Startdatum: 03.07.2016		Startdatum: 03.07.2016	
Enddatum: 08.07.2016		Enddatum: 08.07.2016		Enddatum: 08.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 00448 0628		SN Nr.: 00448 0631		SN Nr.: 00448 0632	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	135	1440	141	1440	141
2880	208	2880	208	2880	203
4320	254	4320	254	4320	259
5760	287	5760	287	5760	287
7200	310	7200	310	7200	310

<b>Mischprobe vom 03.07.2016 auf 04.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 04.07.2016		Startdatum: 04.07.2016		Startdatum: 04.07.2016	
Enddatum: 09.07.2016		Enddatum: 09.07.2016		Enddatum: 09.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 01413 0813		SN Nr.: 01414 0154		SN Nr.: 00006 0052	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	158	1440	169	1440	152
2880	225	2880	237	2880	208
4320	265	4320	270	4320	254
5760	299	5760	304	5760	287
7200	327	7200	327	7200	310

<b>Mischprobe vom 04.07.2016 auf 05.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 05.07.2016		Startdatum: 05.07.2016		Startdatum: 05.07.2016	
Enddatum: 10.07.2016		Enddatum: 10.07.2016		Enddatum: 10.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 00006 0066		SN Nr.: 00006 0069		SN Nr.: 00006 0074	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	220	1440	214	1440	203
2880	304	2880	304	2880	299
4320	366	4320	361	4320	355
5760	406	5760	394	5760	389
7200	445	7200	428	7200	423

Ergebnisse der BSB5-Messungen (OxiTop)

<b>Mischprobe vom 05.07.2016 auf 06.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 06.07.2016		Startdatum: 06.07.2016		Startdatum: 06.07.2016	
Enddatum: 11.07.2016		Enddatum: 11.07.2016		Enddatum: 11.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 01419 0641		SN Nr.: 00006 0080		SN Nr.: 00006 0135	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	163	1440	163	1440	169
2880	259	2880	265	2880	259
4320	304	4320	310	4320	310
5760	355	5760	355	5760	349
7200	383	7200	389	7200	377

<b>Mischprobe vom 06.07.2016 auf 07.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 07.07.2016		Startdatum: 07.07.2016		Startdatum: 07.07.2016	
Enddatum: 12.07.2016		Enddatum: 12.07.2016		Enddatum: 12.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 00216 0780		SN Nr.: 00216 0785		SN Nr.: 00216 0788	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	214	1440	208	1440	203
2880	344	2880	327	2880	321
4320	406	4320	389	4320	383
5760	445	5760	428	5760	428
7200	479	7200	462	7200	462

<b>Mischprobe vom 07.07.2016 auf 08.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 08.07.2016		Startdatum: 08.07.2016		Startdatum: 08.07.2016	
Enddatum: 13.07.2016		Enddatum: 13.07.2016		Enddatum: 13.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 01413 0813		SN Nr.: 01414 0154		SN Nr.: 00006 0052	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	203	1440	203	1440	197
2880	321	2880	321	2880	304
4320	383	4320	383	4320	366
5760	423	5760	423	5760	400
7200	462	7200	462	7200	445

Ergebnisse der BSB5-Messungen (OxiTop)

<b>Mischprobe vom 08.07.2016 auf 09.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 09.07.2016		Startdatum: 09.07.2016		Startdatum: 09.07.2016	
Enddatum: 14.07.2016		Enddatum: 14.07.2016		Enddatum: 14.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 00216 0808		SN Nr.: 00443 0356		SN Nr.: 00443 0375	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	146	1440	141	1440	141
2880	242	2880	231	2880	225
4320	299	4320	287	4320	293
5760	338	5760	327	5760	327
7200	361	7200	355	7200	361

<b>Mischprobe vom 09.07.2016 auf 10.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 10.07.2016		Startdatum: 10.07.2016		Startdatum: 10.07.2016	
Enddatum: 15.07.2016		Enddatum: 15.07.2016		Enddatum: 15.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 00446 0355		SN Nr.: 00448 0610		SN Nr.: 00448 0638	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	141	1440	158	1440	158
2880	220	2880	231	2880	237
4320	276	4320	287	4320	293
5760	310	5760	321	5760	321
7200	338	7200	349	7200	349

<b>Mischprobe vom 10.07.2016 auf 11.07.2016</b>					
Zulauf 1		Zulauf 2		Zulauf 3	
Startdatum: 11.07.2016		Startdatum: 11.07.2016		Startdatum: 11.07.2016	
Enddatum: 16.07.2016		Enddatum: 16.07.2016		Enddatum: 16.07.2016	
Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800		Messbereich in mg/L: 800	
Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97		Füllvolumen in mL: 97	
Kopf:1		Kopf:1		Kopf:1	
SN Nr.: 00448 0628		SN Nr.: 00448 0631		SN Nr.: 00448 0632	
Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]	Zeit [Min.]	BSB [mg/L]
1440	180	1440	175	1440	163
2880	270	2880	254	2880	248
4320	327	4320	315	4320	304
5760	361	5760	355	5760	338
7200	394	7200	383	7200	372

## **Anhang D**

### **Berechnung der CSB-Fraktionen**

# **Berechnung der CSB-Fraktionen nach der SOP**

## **Ergebnisse der 15-tägigen Messkampagne an der ARA Graz-Gössendorf**

durchgeführt vom 26.06.2016 bis zum 11.07.2016

am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der  
Technischen Universität Graz

**Verwendete Gleichungen:**

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} * t}} * BSB_t \quad \text{Gleichung 1}$$

mit:

$k_{BSB}$  ... Konstante erster Ordnung (-),  $BSB_t$  ... biochemischer Sauerstoffbedarf nach  $t$ -Tagen (mg/L),  $BSB_{tot}$  ... mittels Regression approximierter Wert aus den BSB-Messungen (mg/L),  $t$  ... Tag der Messung (-)

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} \quad \text{Gleichung 2}$$

mit:

$BSB_{\infty}$  ... gesamter biologischer Sauerstoff Bedarf (mg/L),  $f_{BOD}$  ... Korrekturfaktor (-),  $BSB_{tot}$  ... mittels Regression approximierter Wert aus der BSB-Messung (mg/L)

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit:

$S_i$  ... gelöst inerte CSB (mg/L),  $CSB_{ABL,FILT,0.1}$  ... CSB Konzentration des 0,1  $\mu$ m Filtrats aus dem Ablauf der ARA (mg/L)

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i \quad \text{Gleichung 4}$$

mit:

$S_i$  ... gelöst inerte CSB (mg/L),  $CSB_{ZUL,FILT,0.1}$  ... CSB Konzentration des 0,1  $\mu$ m-Filtrats aus dem Zulauf der ARA (mg/L),  $S_s$  ... schnell abbaubarer CSB

$$X_s = X_S + X_H = BSB_{\infty} - S_s \quad \text{Gleichung 5}$$

mit:

$X_s$  ... partikulär schwer abbaubarer-CSB (mg/L),  $BSB_{\infty}$  ... gesamter biologischer Sauerstoffbedarf nach Roelvelde & Loosdrecht (2002) (mg/L),  $S_s$  ... schnell abbaubarer CSB

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i \quad \text{Gleichung 6}$$

mit:

$X_i$  ... partikulär inerte CSB (mg/L),  $CSB_{GES}$  ... gesamter chemischer Sauerstoffbedarf,  $S_s$  ... schnell abbaubarer CSB,  $S_i$  ... gelöst inerte CSB (mg/L),  $X_s$  ... partikulär schwer abbaubarer-CSB (mg/L)

## Berechnung der CSB Fraktionen für 26.06.2016

### Gegeben:

min.  $BSB_{1440}=141$  [mg/L], max.  $BSB_{1440}=152$  [mg/L];

min.  $BSB_{2880}=231$  [mg/L], max.  $BSB_{2880}=237$  [mg/L];

min.  $BSB_{4320}=270$  [mg/L], max.  $BSB_{4320}=282$  [mg/L];

min.  $BSB_{5760}=310$  [mg/L], max.  $BSB_{5760}=315$  [mg/L];

min.  $BSB_{7200}=338$  [mg/L], max.  $BSB_{7200}=344$  [mg/L];

### Gewählt (aus der Regression):

$BSB_{1440}=141$  [mg/L] →  $BSB_1=141$  [mg/L] und  $t=1$ [-]

$BSB_{2880}=228$  [mg/L] →  $BSB_2=228$  [mg/L] und  $t=2$ [-]

$BSB_{4320}=282$  [mg/L] →  $BSB_3=282$  [mg/L] und  $t=3$ [-]

$BSB_{5760}=315$  [mg/L] →  $BSB_4=315$  [mg/L] und  $t=4$ [-]

$BSB_{7200}=336$  [mg/L] →  $BSB_5=336$  [mg/L] und  $t=5$ [-]

$k_{BSB} = 0,48$  [-]

### Gleichung 1) →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,48 \cdot 1}} * 141 = 369,87 \text{ [mg/L]}$$

### Gleichung 2) →

Gewählt:  $f_{BOD} = 0,1$  [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 369,87 = 410,97 \text{ [mg/L]}$$

### Gleichung 3) →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (18,4 + 18,1 + 17,7) / 3 = 16,08 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des  $CSB_{ABF,FILT,0.1}$  vom 29.06.2016 genommen!**

### Gleichung 4) →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (79 + 76 + 80) / 3 - 16,08 = 72,25 \text{ [mg/L]}$$

### Gleichung 5) →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 410,97 - 72,25 = 338,72 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{579 + 579 + 613}{3} - 72,25 - 338,72 - 16,08 = 163,28 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 27.06.2016

**Gegeben:**

min. BSB<sub>1440</sub>=135 [mg/L], max. BSB<sub>1440</sub>=130 [mg/L];

min. BSB<sub>2880</sub>=208 [mg/L], max. BSB<sub>2880</sub>=225 [mg/L];

min. BSB<sub>4320</sub>=259 [mg/L], max. BSB<sub>4320</sub>=270 [mg/L];

min. BSB<sub>5760</sub>=293 [mg/L], max. BSB<sub>5760</sub>=299 [mg/L];

min. BSB<sub>7200</sub>=321 [mg/L], max. BSB<sub>7200</sub>=310 [mg/L];

**Gewählt (aus der Regression):**

BSB<sub>1440</sub>=133,5 [mg/L] →BSB<sub>1</sub>=133,5 [mg/L] und t=1[-]

BSB<sub>2880</sub>=216 [mg/L] →BSB<sub>2</sub>=216 [mg/L] und t=2[-]

BSB<sub>4320</sub>=267,5 [mg/L] →BSB<sub>3</sub>=267,5 [mg/L] und t=3[-]

BSB<sub>5760</sub>=299 [mg/L] →BSB<sub>4</sub>=299 [mg/L] und t=4[-]

BSB<sub>7200</sub>=319 [mg/L] →BSB<sub>5</sub>=319 [mg/L] und t=5[-]

k<sub>BSB</sub>= 0,48 [-]

**Gleichung 1) →**

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,48 \cdot 1}} * 133,5 = 350,2 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2) →**

**Gewählt:** f<sub>BOD</sub>= 0,1 [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 215,75 = 389,11 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3) →**

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (20,4+18,9+19,7)/3 = 17,7 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des CSB<sub>ABF,FILT,0.1</sub> vom 29.06.2016 genommen!**

**Gleichung 4) →**

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (79+76+80)/3 - 17,7 = 60,63 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 389,11 - 60,63 = 328,48 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{564 + 549 + 556}{3} - 60,63 - 328,48 - 17,7 = 149,52 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 28.06.2016

**Gegeben:**min. BSB<sub>1440</sub>=231 [mg/L], max. BSB<sub>1440</sub>=242 [mg/L];min. BSB<sub>2880</sub>=383 [mg/L], max. BSB<sub>2880</sub>=400 [mg/L];min. BSB<sub>4320</sub>=456 [mg/L], max. BSB<sub>4320</sub>=473 [mg/L];min. BSB<sub>5760</sub>=501 [mg/L], max. BSB<sub>5760</sub>=513 [mg/L];min. BSB<sub>7200</sub>=530 [mg/L], max. BSB<sub>7200</sub>=541 [mg/L];**Gewählt (aus der Regression):**BSB<sub>1440</sub>=243,7 [mg/L] → BSB<sub>1</sub>=243,7 [mg/L] und t=1[-]BSB<sub>2880</sub>=383 [mg/L] → BSB<sub>2</sub>=383 [mg/L] und t=2[-]BSB<sub>4320</sub>=462,5 [mg/L] → BSB<sub>3</sub>=462,5 [mg/L] und t=3[-]BSB<sub>5760</sub>=508 [mg/L] → BSB<sub>4</sub>=508 [mg/L] und t=4[-]BSB<sub>7200</sub>=534 [mg/L] → BSB<sub>5</sub>=534 [mg/L] und t=5[-]k<sub>BSB</sub>= 0,56 [-]**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,56 \cdot 1}} * 243,7 = 568,34 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →**Gewählt:** f<sub>BOD</sub>= 0,1 [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 568 = 631,49 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (16,9 + 18,2 + 18,1) / 3 = 15,96 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigt! Wert des CSB<sub>ABF,FILT,0.1</sub> vom 29.06.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0,1} - S_i = (156+155+156)/3 - 15,96 = 139,70 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 631 - 139,70 = 491,3 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{843 + 824 + 826}{3} - 139,7 - 491,3 - 15,96 = 184,04 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 29.06.2016

**Gegeben:**

min. BSB<sub>1440</sub>=180 [mg/L], max. BSB<sub>1440</sub>=197 [mg/L];

min. BSB<sub>2880</sub>=293 [mg/L], max. BSB<sub>2880</sub>=332 [mg/L];

min. BSB<sub>4320</sub>=361 [mg/L], max. BSB<sub>4320</sub>=389 [mg/L];

min. BSB<sub>5760</sub>=400 [mg/L], max. BSB<sub>5760</sub>=423 [mg/L];

min. BSB<sub>7200</sub>=428 [mg/L], max. BSB<sub>7200</sub>=445 [mg/L];

**Gewählt (aus Regression):**

BSB<sub>1440</sub>= 188,5 [mg/L] →BSB<sub>1</sub>= 188,5 [mg/L] und t=1[-]

BSB<sub>2880</sub>= 304 [mg/L] →BSB<sub>2</sub>= 304 [mg/L] und t=2[-]

BSB<sub>4320</sub>= 375 [mg/L] →BSB<sub>3</sub>= 375 [mg/L] und t=3[-]

BSB<sub>5760</sub>= 418 [mg/L] →BSB<sub>4</sub>= 418 [mg/L] und t=4[-]

BSB<sub>7200</sub>= 444,5 [mg/L] →BSB<sub>5</sub>= 444,5 [mg/L] und t=5[-]

k<sub>BSB</sub>= 0,49 [-]

**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,49 \cdot 1}} * 188,5 = 486,61 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →

**Gewählt:** f<sub>BOD</sub>= 0,1 [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 486,61 = 540,68 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (16,6+17,2+17,2)/3 = 15,3 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des  $CSB_{ABL,FILT,0.1}$  vom 30.06.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (132+135+136)/3 - 15,3 = 119,1 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 540,68 - 119,1 = 421,58 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{696 + 690 + 711}{3} - 119,1 - 401 - 15,3 = 143,02 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 30.06.2016

**Gegeben:**

min.  $BSB_{1440}=130$  [mg/L], max.  $BSB_{1440}=135$  [mg/L];

min.  $BSB_{2880}=192$  [mg/L], max.  $BSB_{2880}=214$  [mg/L];

min.  $BSB_{4320}=248$  [mg/L], max.  $BSB_{4320}=254$  [mg/L];

min.  $BSB_{5760}=282$  [mg/L], max.  $BSB_{5760}=287$  [mg/L];

min.  $BSB_{7200}=304$  [mg/L], max.  $BSB_{7200}=315$  [mg/L];

**Gewählt (aus Regression):**

$BSB_{1440}= 130,5$  [mg/L] →  $BSB_1= 130,5$  [mg/L] und  $t=1[-]$

$BSB_{2880}= 209,5$  [mg/L] →  $BSB_2= 209,5$  [mg/L] und  $t=2[-]$

$BSB_{4320}= 257,5$  [mg/L] →  $BSB_3= 257,5$  [mg/L] und  $t=3[-]$

$BSB_{5760}= 287$  [mg/L] →  $BSB_4= 287$  [mg/L] und  $t=4[-]$

$BSB_{7200}= 304$  [mg/L] →  $BSB_5= 304$  [mg/L] und  $t=5[-]$

$k_{BSB}= 0,5$  [-]

**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} * t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,5 * 1}} * 130,5 = 331,66 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →

**Gewählt:**  $f_{BOD}= 0,1$  [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 332 = 368 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (14,6+14,5+14,6)/3 = 14,6 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des CSB<sub>ABL,FILT,0.1</sub> vom 30.06.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (112+113+114)/3 - 14,6 = 98,4 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 369 - 98,4 = 270,6 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{598 + 606 + 601}{3} - 98,4 - 270,6 - 14,6 = 218,07 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 01.07.2016

**Gegeben:**

min. BSB<sub>1440</sub>=118 [mg/L], max. BSB<sub>1440</sub>=124 [mg/L];

min. BSB<sub>2880</sub>=180 [mg/L], max. BSB<sub>2880</sub>=186 [mg/L];

min. BSB<sub>4320</sub>=231 [mg/L], max. BSB<sub>4320</sub>=237 [mg/L];

min. BSB<sub>5760</sub>=265 [mg/L], max. BSB<sub>5760</sub>=265 [mg/L];

min. BSB<sub>7200</sub>=287 [mg/L], max. BSB<sub>7200</sub>=287 [mg/L];

**Gewählt (aus Regression):**

BSB<sub>1440</sub>= 108 [mg/L] →BSB<sub>1</sub>= 108 [mg/L] und t=1[-]

BSB<sub>2880</sub>= 181 [mg/L] →BSB<sub>2</sub>= 181 [mg/L] und t=2[-]

BSB<sub>4320</sub>= 231 [mg/L] →BSB<sub>3</sub>= 231 [mg/L] und t=3[-]

BSB<sub>5760</sub>= 264,5 [mg/L] →BSB<sub>4</sub>= 264,5 [mg/L] und t=4[-]

BSB<sub>7200</sub>= 287 [mg/L] →BSB<sub>5</sub>= 287 [mg/L] und t=5[-]

k<sub>BSB</sub>= 0,39 [-]

**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} * t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,39 * 1}} * 108 = 334 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →

**Gewählt:**  $f_{BOD} = 0,1$  [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 334,42 = 371 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (14,6+14,5+14,6)/3 = 15 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des  $CSB_{ABL,FILT,0.1}$  vom 30.06.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (98+97+99)/3 - 15 = 83 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 371 - 83 = 288 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{537 - 563 - 587}{3} - 83 - 288 - 15 = 176,33 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 02.07.2016

**Gegeben:**

min.  $BSB_{1440} = 135$  [mg/L], max.  $BSB_{1440} = 141$  [mg/L];

min.  $BSB_{2880} = 203$  [mg/L], max.  $BSB_{2880} = 208$  [mg/L];

min.  $BSB_{4320} = 254$  [mg/L], max.  $BSB_{4320} = 259$  [mg/L];

min.  $BSB_{5760} = 287$  [mg/L], max.  $BSB_{5760} = 287$  [mg/L];

min.  $BSB_{7200} = 310$  [mg/L], max.  $BSB_{7200} = 310$  [mg/L];

**Gewählt (aus Regression):**

$BSB_{1440} = 135,5$  [mg/L] →  $BSB_1 = 135,5$  [mg/L] und  $t=1$  [-]

$BSB_{2880} = 216$  [mg/L] →  $BSB_2 = 216$  [mg/L] und  $t=2$  [-]

$BSB_{4320} = 264$  [mg/L] →  $BSB_3 = 264$  [mg/L] und  $t=3$  [-]

$BSB_{5760} = 293$  [mg/L] →  $BSB_4 = 293$  [mg/L] und  $t=4$  [-]

$BSB_{7200} = 310$  [mg/L] →  $BSB_5 = 310$  [mg/L] und  $t=5$  [-]

$k_{BSB} = 0,52$  [-]

**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,52 \cdot 1}} * 135,5 = 334 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →

**Gewählt:**  $f_{BOD} = 0,1$  [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 334 = 371 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0,1} = 0,9 (16,7 + 16,6 + 16,7) / 3 = 15 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des  $CSB_{ABL,FILT,0,1}$  vom 30.06.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0,1} - S_i = (80 + 81 + 81) / 3 - 15 = 66 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 371 - 66 = 305 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{516 + 517 + 501}{3} - 66 - 305 - 15 = 125 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 03.07.2016

**Gegeben:**

min.  $BSB_{1440} = 158$  [mg/L], max.  $BSB_{1440} = 169$  [mg/L];

min.  $BSB_{2880} = 208$  [mg/L], max.  $BSB_{2880} = 237$  [mg/L];

min.  $BSB_{4320} = 254$  [mg/L], max.  $BSB_{4320} = 270$  [mg/L];

min.  $BSB_{5760} = 287$  [mg/L], max.  $BSB_{5760} = 304$  [mg/L];

min.  $BSB_{7200} = 310$  [mg/L], max.  $BSB_{7200} = 327$  [mg/L];

**Gewählt (aus Regression):**

$BSB_{1440} = 156,5$  [mg/L] →  $BSB_1 = 156,5$  [mg/L] und  $t=1$  [-]

$BSB_{2880} = 237$  [mg/L] →  $BSB_2 = 237$  [mg/L] und  $t=2$  [-]

$BSB_{4320} = 279$  [mg/L] →  $BSB_3 = 279$  [mg/L] und  $t=3$  [-]

$BSB_{5760} = 300$  [mg/L] →  $BSB_4 = 300$  [mg/L] und  $t=4$  [-]

$BSB_{7200} = 312$  [mg/L] →  $BSB_5 = 312$  [mg/L] und  $t=5$  [-]

$$k_{BSB} = 0,66 \text{ [-]}$$

**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,66 \cdot 1}} * 156,5 = 323,92 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →

**Gewählt:**  $f_{BOD} = 0,1 \text{ [-]}$

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 334 = 359,91 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0,1} = 0,9 (17,9 + 17,4 + 17,8) / 3 = 18,6 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des  $CSB_{ABL,FILT,0,1}$  vom 30.06.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0,1} - S_i = (98 + 98 + 96) / 3 - 18,6 = 78,73 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 359,91 - 78,73 = 281,18 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{540 + 530 + 536}{3} - 78,73 - 281,18 - 18,6 = 156,82 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 04.07.2016

**Gegeben:**

min.  $BSB_{1440} = 203 \text{ [mg/l]}$ , max.  $BSB_{1440} = 214 \text{ [mg/L]}$ ;

min.  $BSB_{2880} = 299 \text{ [mg/l]}$ , max.  $BSB_{2880} = 304 \text{ [mg/L]}$ ;

min.  $BSB_{4320} = 355 \text{ [mg/l]}$ , max.  $BSB_{4320} = 366 \text{ [mg/L]}$ ;

min.  $BSB_{5760} = 389 \text{ [mg/l]}$ , max.  $BSB_{5760} = 406 \text{ [mg/L]}$ ;

min.  $BSB_{7200} = 423 \text{ [mg/l]}$ , max.  $BSB_{7200} = 445 \text{ [mg/L]}$ ;

**Gewählt (aus Regression):**

$BSB_{1440} = 212,5 \text{ [mg/L]}$  →  $BSB_1 = 212,5 \text{ [mg/L]}$  und  $t=1 \text{ [-]}$

$BSB_{2880} = 322 \text{ [mg/L]}$  →  $BSB_2 = 322 \text{ [mg/L]}$  und  $t=2 \text{ [-]}$

$$BSB_{4320} = 379 \text{ [mg/L]} \quad \rightarrow BSB_3 = 379 \text{ [mg/L]} \text{ und } t=3[-]$$

$$BSB_{5760} = 408 \text{ [mg/L]} \quad \rightarrow BSB_4 = 408 \text{ [mg/L]} \text{ und } t=4[-]$$

$$BSB_{7200} = 423 \text{ [mg/L]} \quad \rightarrow BSB_5 = 423 \text{ [mg/L]} \text{ und } t=5[-]$$

$$k_{BSB} = 0,66 \text{ [-]}$$

**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,66 \cdot 1}} * 212,5 = 439 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →

**Gewählt:**  $f_{BOD} = 0,1 \text{ [-]}$

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 439 = 488 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (16,3 + 16,2 + 15,9) / 3 = 14,52 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des  $CSB_{ABL,FILT,0.1}$  vom 05.07.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (122 + 121 + 120) / 3 - 14,52 = 106,48 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 488 - 106,48 = 381,52 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$\begin{aligned} X_i &= CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{671 + 685 + 669}{3} - 106,48 - 381,52 - 14,52 \\ &= 172,48 \text{ [mg/L]} \end{aligned}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 05.07.2016

**Gegeben:**

min.  $BSB_{1440} = 163 \text{ [mg/L]}$ , max.  $BSB_{1440} = 169 \text{ [mg/L]}$ ;

min.  $BSB_{2880} = 259 \text{ [mg/L]}$ , max.  $BSB_{2880} = 265 \text{ [mg/L]}$ ;

min.  $BSB_{4320} = 304 \text{ [mg/L]}$ , max.  $BSB_{4320} = 310 \text{ [mg/L]}$ ;

min.  $BSB_{5760} = 349 \text{ [mg/L]}$ , max.  $BSB_{5760} = 355 \text{ [mg/L]}$ ;

min.  $BSB_{7200} = 377 \text{ [mg/L]}$ , max.  $BSB_{7200} = 389 \text{ [mg/L]}$ ;

**Gewählt (aus Regression):**

$BSB_{1440} = 163 \text{ [mg/L]}$  →  $BSB_1 = 163 \text{ [mg/L]}$  und  $t=1[-]$

$BSB_{2880} = 261 \text{ [mg/L]}$  →  $BSB_2 = 261 \text{ [mg/L]}$  und  $t=2[-]$

$BSB_{4320} = 320 \text{ [mg/L]}$  →  $BSB_3 = 320 \text{ [mg/L]}$  und  $t=3[-]$

$BSB_{5760} = 355 \text{ [mg/L]}$  →  $BSB_4 = 355 \text{ [mg/L]}$  und  $t=4[-]$

$BSB_{7200} = 389 \text{ [mg/L]}$  →  $BSB_5 = 377 \text{ [mg/L]}$  und  $t=5[-]$

$k_{BSB} = 0,51 [-]$

**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,51 \cdot 1}} * 163 = 408 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →

**Gewählt:**  $f_{BOD} = 0,1 [-]$

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 408 = 453 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (17,4 + 17,2 + 17,5) / 3 = 15,63 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des  $CSB_{ABL,FILT,0.1}$  vom 06.07.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (111 + 110 + 107) / 3 - 15,63 = 93,37 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 453 - 93,37 = 359,63 \text{ [mg/L]}$$

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{638 + 657 + 635}{3} - 93,37 - 359,63 - 15,63 = 174,7 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 06.07.2016

**Gegeben:**

min.  $BSB_{1440} = 203 \text{ [mg/L]}$ , max.  $BSB_{1440} = 214 \text{ [mg/L]}$ ;

min.  $BSB_{2880} = 321 \text{ [mg/L]}$ , max.  $BSB_{2880} = 344 \text{ [mg/L]}$ ;

min.  $BSB_{4320} = 383$  [mg/L], max.  $BSB_{4320} = 406$  [mg/L];

min.  $BSB_{5760} = 428$  [mg/L], max.  $BSB_{5760} = 445$  [mg/L];

min.  $BSB_{7200} = 462$  [mg/L], max.  $BSB_{7200} = 479$  [mg/L];

**Gewählt (aus Regression):**

$BSB_{1440} = 203$  [mg/L] →  $BSB_1 = 203$  [mg/L] und  $t=1$  [-]

$BSB_{2880} = 323,5$  [mg/L] →  $BSB_2 = 323,5$  [mg/L] und  $t=2$  [-]

$BSB_{4320} = 395$  [mg/L] →  $BSB_3 = 395$  [mg/L] und  $t=3$  [-]

$BSB_{5760} = 438$  [mg/L] →  $BSB_4 = 438$  [mg/L] und  $t=4$  [-]

$BSB_{7200} = 463$  [mg/L] →  $BSB_5 = 463$  [mg/L] und  $t=5$  [-]

$k_{BSB} = 0,52$  [-]

**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,52 \cdot 1}} 203 = 500 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →

**Gewählt:**  $f_{BOD} = 0,1$  [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 500 = 556 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (24,2+24,4+25,6)/3 = 22,26 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des  $CSB_{ABL,FILT,0.1}$  vom 07.07.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (140+140+142)/3 - 22,26 = 118,4 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 556 - 118,4 = 437,6 \text{ [mg/L]}$$

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{774 + 757 + 757}{3} - 118,4 - 437,6 - 22,26 = 184,4 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 07.07.2016

### Gegeben:

min.  $BSB_{1440} = 197$  [mg/L], max.  $BSB_{1440} = 203$  [mg/L];

min.  $BSB_{2880} = 304$  [mg/L], max.  $BSB_{2880} = 321$  [mg/L];

min.  $BSB_{4320} = 366$  [mg/L], max.  $BSB_{4320} = 383$  [mg/L];

min.  $BSB_{5760} = 400$  [mg/L], max.  $BSB_{5760} = 423$  [mg/L];

min.  $BSB_{7200} = 445$  [mg/L], max.  $BSB_{7200} = 462$  [mg/L];

### Gewählt (aus Regression):

$BSB_{1440} = 197$  [mg/L] →  $BSB_1 = 197$  [mg/L] und  $t=1$  [-]

$BSB_{2880} = 313$  [mg/L] →  $BSB_2 = 313$  [mg/L] und  $t=2$  [-]

$BSB_{4320} = 381$  [mg/L] →  $BSB_3 = 381$  [mg/L] und  $t=3$  [-]

$BSB_{5760} = 421$  [mg/L] →  $BSB_4 = 421$  [mg/L] und  $t=4$  [-]

$BSB_{7200} = 445$  [mg/L] →  $BSB_5 = 445$  [mg/L] und  $t=5$  [-]

$k_{BSB} = 0,53$  [-]

### Gleichung 1) →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,53 \cdot 1}} 197 = 478 \text{ [mg/L]}$$

### Gleichung 2) →

Gewählt:  $f_{BOD} = 0,1$  [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 478 = 531 \text{ [mg/L]}$$

### Gleichung 3) →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0,1} = 0,9 (23,4 + 22,1 + 22,5) / 3 = 20,4 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des  $CSB_{ABL,FILT,0,1}$  vom 08.07.2016 genommen!**

### Gleichung 4) →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0,1} - S_i = (162 + 159 + 167) / 3 - 20,4 = 142,27 \text{ [mg/L]}$$

### Gleichung 5) →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 531 - 142,27 = 388,73 \text{ [mg/L]}$$

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{756 + 725 + 726}{3} - 142,27 - 388,73 - 20,4 \\ = 184,27 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 08.07.2016

### Gegeben:

min. BSB<sub>1440</sub>=141 [mg/L], max. BSB<sub>1440</sub>=146 [mg/L];

min. BSB<sub>2880</sub>=225 [mg/L], max. BSB<sub>2880</sub>=242 [mg/L];

min. BSB<sub>4320</sub>=287 [mg/L], max. BSB<sub>4320</sub>=299 [mg/L];

min. BSB<sub>5760</sub>=327 [mg/L], max. BSB<sub>5760</sub>=338 [mg/L];

min. BSB<sub>7200</sub>=355 [mg/L], max. BSB<sub>7200</sub>=361 [mg/L];

### Gewählt (aus Regression):

BSB<sub>1440</sub>= 141 [mg/L] →BSB<sub>1</sub>= 141 [mg/L] und t=1[-]

BSB<sub>2880</sub>= 234 [mg/L] →BSB<sub>2</sub>= 234 [mg/L] und t=2[-]

BSB<sub>4320</sub>= 295 [mg/L] →BSB<sub>3</sub>= 295 [mg/L] und t=3[-]

BSB<sub>5760</sub>= 335 [mg/L] →BSB<sub>4</sub>= 335 [mg/L] und t=4[-]

BSB<sub>7200</sub>= 361 [mg/L] →BSB<sub>5</sub>= 361 [mg/L] und t=5[-]

k<sub>BSB</sub>= 0,42 [-]

### Gleichung 1) →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,42 \cdot 1}} * 141 = 411,14 \text{ [mg/L]}$$

### Gleichung 2) →

Gewählt: f<sub>BOD</sub>= 0,1 [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 334 = 456,82 \text{ [mg/L]}$$

### Gleichung 3) →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (25,7+24,4+24,6)/3 = 22,41 \\ \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des CSB<sub>ABL,FILT,0.1</sub> vom 30.06.2016 genommen!**

### Gleichung 4) →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (150+150+153)/3 - 22,41 = 128,59 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 456,82 - 128,59 = 328,53 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{640 + 643 + 650}{3} - 128,59 - 328,53 - 22,41 = 164,8 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 09.07.2016

**Gegeben:**

min. BSB<sub>1440</sub>=141 [mg/L], max. BSB<sub>1440</sub>=158 [mg/L];

min. BSB<sub>2880</sub>=220 [mg/L], max. BSB<sub>2880</sub>=237 [mg/L];

min. BSB<sub>4320</sub>=276 [mg/L], max. BSB<sub>4320</sub>=293 [mg/L];

min. BSB<sub>5760</sub>=310 [mg/L], max. BSB<sub>5760</sub>=321 [mg/L];

min. BSB<sub>7200</sub>=338 [mg/L], max. BSB<sub>7200</sub>=349 [mg/L];

**Gewählt (aus Regression):**

BSB<sub>1440</sub>= 145 [mg/L] →BSB<sub>1</sub>= 145 [mg/L] und t=1[-]

BSB<sub>2880</sub>= 233 [mg/L] →BSB<sub>2</sub>= 233 [mg/L] und t=2[-]

BSB<sub>4320</sub>= 286 [mg/L] →BSB<sub>3</sub>= 286 [mg/L] und t=3[-]

BSB<sub>5760</sub>= 319 [mg/L] →BSB<sub>4</sub>= 319 [mg/L] und t=4[-]

BSB<sub>7200</sub>= 338 [mg/L] →BSB<sub>5</sub>= 338 [mg/L] und t=5[-]

k<sub>BSB</sub>= 0,5 [-]

**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,5 \cdot 1}} * 145 = 368,52 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →

**Gewählt:** f<sub>BOD</sub>= 0,1 [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 368,52 = 409,47 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (25,6+23,8+24,0)/3 = 22,02 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des CSB<sub>ABL,FILT,0.1</sub> vom 30.06.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (130+130+130)/3 - 22,02 = 107,98 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 409,47 - 107,98 = 301,49 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 6)**

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{610 + 619 + 595}{3} - 107,98 - 301,49 - 22,02 = 176,51 \text{ [mg/L]}$$

## Berechnung der CSB Fraktionen für 10.07.2016

**Gegeben:**

min. BSB<sub>1440</sub> = 163 [mg/L], max. BSB<sub>1440</sub> = 180 [mg/L];

min. BSB<sub>2880</sub> = 248 [mg/L], max. BSB<sub>2880</sub> = 270 [mg/L];

min. BSB<sub>4320</sub> = 304 [mg/L], max. BSB<sub>4320</sub> = 327 [mg/L];

min. BSB<sub>5760</sub> = 338 [mg/L], max. BSB<sub>5760</sub> = 361 [mg/L];

min. BSB<sub>7200</sub> = 372 [mg/L], max. BSB<sub>7200</sub> = 394 [mg/L];

**Gewählt (aus Regression):**

BSB<sub>1440</sub> = 170 [mg/L] → BSB<sub>1</sub> = 170 [mg/L] und t=1[-]

BSB<sub>2880</sub> = 267 [mg/L] → BSB<sub>2</sub> = 267 [mg/L] und t=2[-]

BSB<sub>4320</sub> = 323 [mg/L] → BSB<sub>3</sub> = 323 [mg/L] und t=3[-]

BSB<sub>5760</sub> = 354 [mg/L] → BSB<sub>4</sub> = 354 [mg/L] und t=4[-]

BSB<sub>7200</sub> = 372 [mg/L] → BSB<sub>5</sub> = 372 [mg/L] und t=5[-]

k<sub>BSB</sub> = 0,56 [-]

**Gleichung 1)** →

$$BSB_{tot} = \frac{1}{1 - e^{-k_{BSB} \cdot t}} * BSB_t = \frac{1}{1 - e^{-0,56 \cdot 1}} 170 = 396 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 2)** →

**Gewählt:** f<sub>BOD</sub> = 0,1 [-]

$$BSB_{\infty} = \frac{1}{1 - f_{BOD}} * BSB_{tot} = \frac{1}{1 - 0,1} * 396 = 440 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 3)** →

$$S_i = 0,9 * CSB_{ABL,FILT,0.1} = 0,9 (27,1+24,2+27,5)/3 = 23,64 \text{ [mg/L]}$$

**Bemerkung: Verweilzeit von 24 h berücksichtigen! Wert des CSB<sub>ABL,FILT,0.1</sub> vom 08.07.2016 genommen!**

**Gleichung 4)** →

$$S_s = CSB_{ZUL,FILT,0.1} - S_i = (108+114+115)/3 - 23,64 = 88,7 \text{ [mg/L]}$$

**Gleichung 5)** →

$$X_s = BSB_{\infty} - S_s = 440 - 88,77 = 351,23 \text{ [mg/L]}$$

$$X_i = CSB_{GES} - S_s - X_s - S_i = \frac{640 + 653 + 643}{3} - 88,77 - 351,23 - 23,64 \\ = 181,7 \text{ [mg/L]}$$

## Anhang E – Filterversuche, um Filterbluten festzustellen

## Filterversuch, um Filterbluten festzustellen

Filterversuch um Filterbluten festzustellen									
Zulauf + Ablauf = 24 h Mischprobe									
Probe	Einheit	Zulauf			Zulauf MW	Ablauf			Ablauf MW
		8.7./9.7.2016				8.7./9.7.2016			
CSB 0,45 µm filtriert ohne Vorreinigung	mg/L	133	133	133	133	22,1	21,9	22	22,0
CSB 0,45 µm filtriert mit 400 mL Dest.H <sub>2</sub> O Vorwaschen		127	127	127	127	18,2	18,3	18,4	18,3
	mg/L	9.7./10.7.2016				9.7./10.7.2016			
CSB 0,45 µm filtriert ohne Vorreinigung	mg/L	121	121	121	121	21,8	21,8	21,7	21,8
CSB 0,45 µm filtriert mit 400 mL Dest.H <sub>2</sub> O Vorwaschen		115	115	115	115	17,7	17,3	17,2	17,4

	mg/L	8.7./9.7.2016				8.7./9.7.2016			
CSB 0,1 µm filtriert ohne Vorreinigung	mg/L	135	135	135	135	23,1	23,2	23,2	23,2
CSB 0,1 µm filtriert mit 400 mL Dest.H <sub>2</sub> O Vorwaschen		117	117	117	117	18,2	18,1	18,4	18,2
	mg/L	9.7./10.7.2016				9.7./10.7.2016			
CSB 0,1 µm filtriert ohne Vorreinigung	mg/L	119	119	119	119	22,3	22,2	22,8	22,4
CSB 0,1 µm filtriert mit 400 mL Dest.H <sub>2</sub> O Vorwaschen		105	105	105	105	17,8	17,7	17,9	17,8

## Anhang F – Gegenüberstellung von Fällung und Filtration

### Vorversuche

#### Gegenüberstellung von Fällung und Filtration

Probe		Zulauf MW [mg/L]	Ablauf MW [mg/L]
CSB (homogenisiert)		495	48
CSB (0,45 µm membranfiltriert)		90	18
CSB (0,1 µm membranfiltriert)		70	17
CSB (0,45 µm mit ZNSO <sub>4</sub> )	1. Fällung	65	13
CSB (0,45 µm mit ZNSO <sub>4</sub> )	2. Fällung	60	13
CSB (0,45 µm mit ZNSO <sub>4</sub> )	3. Fällung	64	20
CSB (0,45 µm mit FeCl <sub>3</sub> )	1. Fällung	65	13
CSB (0,45 µm mit FeCl <sub>3</sub> )	2. Fällung	55	9
CSB (0,45 µm mit FeCl <sub>3</sub> )	3. Fällung	51	13

**Zulauf + Ablauf = 24 h Mischprobe  
vom 19.06.2016 - 20.06.2016**

Probe		Ein- heit	Zulauf			Zu- lauf MW	Ablauf			Ablauf MW
CSB (homogenisiert)		[mg/L]	490	490	491	<b>490</b>	49,2	49,3	49,2	<b>49,2</b>
			499	499	500	<b>499</b>	46,2	46,3	46,2	<b>46,2</b>
CSB (0,45 µm membranf.)		[mg/L]	86,5	86,4	86,3	<b>86</b>	18,9	18,8	18,9	<b>18,9</b>
			93,3	93,3	93,3	<b>93</b>	17,4	17,6	17,3	<b>17,4</b>
CSB (0,45 µm mit ZNSO4)	1.Fällung	[mg/L]	64,7	65,1	64,6	<b>65</b>	14,3	14,5	14,3	<b>14,4</b>
			64,1	63,9	63,9	<b>64</b>	13	13	12,9	<b>13,0</b>
	1.Fällung	[mg/L]	64,7	64,7	64,6	<b>65</b>	12,7	12,7	12,7	<b>12,7</b>
			66,1	66,1	66,1	<b>66</b>	13,3	13,2	13,3	<b>13,3</b>
CSB (0,45 µm mit ZNSO4)	2.Fällung	[mg/L]	60,9	61	61	<b>61</b>	13,6	13,3	13,2	<b>13,4</b>
			60,8	60,8	60,7	<b>61</b>	11,3	11,6	11,2	<b>11,4</b>
	2.Fällung	[mg/L]	59,3	59,3	59,3	<b>59</b>	13,3	13,5	13,2	<b>13,3</b>
			58,8	58,7	58,8	<b>59</b>	12,8	12,6	12,7	<b>12,7</b>
CSB (0,45 µm mit ZNSO4)	3.Fällung	[mg/L]	67,2	97,1	67,2	<b>77</b>	20,4	20,5	20,4	<b>20,4</b>
			56,2	56,3	56,2	<b>56</b>	19,1	18,9	19,3	<b>19,1</b>
	3.Fällung	[mg/L]	60,2	60,2	60,2	<b>60</b>	19,7	19,8	19,8	<b>19,8</b>
			61,2	61,2	61	<b>61</b>	20,1	20,2	20,4	<b>20,2</b>
CSB (0,45 µm mit FeCl <sub>3</sub> )	1.Fällung	[mg/L]	65,8	66	65,8	<b>66</b>	15,1	15	15,1	<b>15,1</b>
			65,3	65,2	65,4	<b>65</b>	16,1	16	16	<b>16,0</b>
	1.Fällung	[mg/L]	65	64,8	65	<b>65</b>	11,5	11,3	11,4	<b>11,4</b>
			64,8	64,7	64,7	<b>65</b>	10,2	9,95	10,1	<b>10,1</b>

Anhang F – Gegenüberstellung von Fällung und Filtration

CSB (0,45 µm mit FeCl <sub>3</sub> )	2.Fällung	[mg/L]	56,6	56,6	56,6	<b>57</b>	7,01	7,43	7,47	<b>7,3</b>
			54,5	54,5	54,4	<b>54</b>	8,58	8,78	8,52	<b>8,6</b>
	2.Fällung	[mg/L]	54,2	54,2	54,1	<b>54</b>	10,5	10,6	10,4	<b>10,5</b>
			53,7	53,5	53,6	<b>54</b>	10,4	10	10,6	<b>10,3</b>
CSB (0,45 µm mit FeCl <sub>3</sub> )	3.Fällung	[mg/L]	49,3	49,2	49,4	<b>49</b>	13,8	13,5	14	<b>13,8</b>
			48,5	48,6	48,6	<b>49</b>	13,5	13,2	13,4	<b>13,4</b>
	3.Fällung	[mg/L]	52,5	52,5	52,7	<b>53</b>	13,6	13	13,1	<b>13,2</b>
			52,7	52,8	52,8	<b>53</b>	13,5	13,8	13,5	<b>13,6</b>
CSB (0,1 µm membranfiltriert)		[mg/L]	69,9	69,9	69,9	<b>70</b>	16,6	16,6	16,7	<b>16,6</b>
			70,4	70,3	70,3	<b>70</b>	17,1	17,1	17	<b>17,1</b>