

Schlussbericht März 2003

Bioenergie, Protein & Fasern aus Gras

Monitoring des Biogasprozesses

Ausgearbeitet durch

U. Baier, P. Delavy

HSW Hochschule Wädenswil

Im Auftrag der

BIOENERGIE SCHAFFHAUSEN AG

und der

2B Biorefineries AG

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie
Forschungs- und P+D-Programm Biomasse

Auftragnehmer Gesamtprojekt:

Bioenergie Schaffhausen AG
c/o Etawatt Schaffhausen AG
Mühlenstrasse 21
CH 8201 Schaffhausen

Auftragnehmer Biogas Monitoring:

HSW Hochschule Wädenswil
Einsiedlerstrasse 31
CH 8820 Wädenswil

Autoren:

Urs Baier
Pascal Delavy

Dieses Dokument ist im Auftrag des BFE Bundesamt für Energie erarbeitet worden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind alleine die Autoren verantwortlich

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3036 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb:

ENET

Egnacherstrasse 69, CH-9320 Arbon
Tel. 071 440 02 55, Fax 071 440 02 56, enet@temas.ch • www.energieforschung.ch • www.energie-schweiz.ch

Zusammenfassung

Seit Sommer 2001 ist in Schaffhausen die **erste grosstechnische Schweizer Grasraffinerie** in Betrieb. Sie beinhaltet neben der Grasverarbeitung zu Fasern und Protein die Verwertung der flüssigen Rückstände in einem Biogasreaktor. Die durch das *BFE Bundesamt für Energie* unterstützte P+D Biogasanlage wird durch die *Bioenergie Schaffhausen* betrieben und produziert bei Volllast jährlich 2000 MWh an Ökostrom (10 % Eigenbedarf) und 3000 MWh an Ökowärme (50 % Eigenbedarf).

In einer durch die Technologieinhaberin *2B Biorefineries AG* in Auftrag gegebenen **Laboruntersuchung** wurden durch die *HSW Hochschule Wädenswil* vorgängig zum Bau und Betrieb der P+D Biogasanlage das anaerobe Biogaspotential und die Abbaubarkeit flüssiger Rückstände aus der Grasraffination untersucht sowie mögliche Nährstofflimitationen und Hemmeffekte aufgezeigt.

Während einer ersten 8 monatigen Betriebsphase der P+D Biogasanlage wurde in Schaffhausen ein intensives **Monitoring** der wichtigsten Betriebsparameter durchgeführt. Die Massenbilanzen für Kohlenstoff und Stickstoff wurden erstellt und die Entwicklung des anaeroben Pelletschlammes wurde charakterisiert. Aus den betrieblichen Daten sind die Leistungskennzahlen des EGSB Bioreaktors ermittelt worden.

Das erste Betriebsjahr der Grasraffinerie war geprägt durch die nur teilweise Ausschöpfung der Verarbeitungskapazität von Gras und durch den Wegfall der Proteinabtrennung und –Produktion. Entsprechend war der EGSB Biogasreaktor im Vergleich zu den Dimensionierungsvorgaben hydraulisch stark unterbelastet, hatte jedoch ein Substrat zu verarbeiten, welches durch eine erhöhte ungelöste Eiweissfraktion gekennzeichnet war. Für den anaeroben EGSB Reaktor wurden daher die Rahmenbedingungen eines stabilen Betriebs bei erhöhter Last oder bei vorgeschalteter Proteinaufarbeitung ausgearbeitet.

Abstract

Starting in Summer 2001 the **first full scale Swiss Biorefinery for grass processing** took up operation in Schaffhausen. Grass processing covers the production of technical fibres and protein concentrate as well as anaerobic digestion of residual slops for the production of biogas and green electricity. The refinery acts as a P+D (pilot + demonstration) project of the *Swiss Federal Energy Agency BFE* and is operated by *Bioenergie Schaffhausen*. Under full load it will deliver 2000 MWh of green electricity (10% own needs) and 3000 MWh heat (50% own needs).

Prior to start up the Swiss technology holder *2B Biorefineries AG* charged the *University of Applied Sciences HSW* with **lab scale testing** of the mesophilic biogas potential and anaerobic degradability of residual grass processing slops. Nutrient limitations and possible inhibition risks were evaluated.

During the initial 8 months of full scale operation of the refinery in Schaffhausen an intensive **monitoring** of the anaerobic digester's performance was carried out. Carbon and Nitrogen mass balances have been set up and the development of the granular EGSB sludge was characterised. From operational data a set of performance values was elaborated.

The first year of operation was characterised by only partial exploitation of the refinery's grass processing capacity. Furthermore the protein separation and production unit has not yet been incorporated. Consequently the EGSB biogas reactor showed a significant hydraulic underload when compared to dimensioning basics. Raw residuals were characterised by a higher particulate protein fraction. Operational conditions for the EGSB reactor were worked out to allow stable operation at elevated load conditions and with protein separation in operation.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
Abkürzungen	4
Messparameter	4
Einheiten	4
1. Projektumfeld „Bioenergie, Protein und Fasern aus Gras“	5
2. Zielsetzungen	7
3. Laborversuche.....	8
3.1 Anaerobe Abbaubarkeit von Schlempe aus der Bioethanolproduktion	8
3.2 Chemische Hydrolyse der Proteinfraction.....	11
3.3 Schlussfolgerungen aus Laborstudien & Pilotierung.....	12
4. P+D Anlage der Bioenergie Schaffhausen AG	14
4.1 Produktion von Fasern und Protein aus Gras.....	14
4.2 Produktion von Biogas aus Grasschlempe	14
5. Monitoring der P+D Biogasanlage	16
5.1 Methoden	16
5.2 Betriebsperioden	16
5.3 Substrate: Zusammensetzung & Menge.....	17
5.4 Massenbilanzen der Silageperiode	20
5.5 Massenbilanzen der Grasperiode	23
5.6 Schwefelbilanz.....	25
5.7 Zusammenfassung der Zulauf- und Ablaufdaten	26
5.8 Monatsbilanzen Feststoffe	27
5.9 Zeitlicher Verlauf chemisch-physikalischer Parameter	28
5.10 Biomassebilanz des EGSB Reaktors	30
5.11 Vertikale Schlammprofile des EGSB Reaktors.....	32
5.12 Zeitliche Entwicklung der Leistungskennzahlen	36
6. Schlussfolgerungen	41
6.1 Anaerober Abbau	41
6.2 EGSB Reaktor.....	41
6.3 EGSB Pellets	42
7. Perspektiven.....	43
8. Medienmeldung Schaffhauser Nachrichten	44
9. Quellen.....	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verfahrensfließbild Grasraffination.....	6
Abbildung 2: Abhängigkeit des CSB-Abbaus von der Raumbelastung bei der Gras- schlempe im Labor UASB Reaktor	10
Abbildung 3: Abhängigkeit des CSB-Abbaus von der Raumbelastung bei der Gemüse- schlempe im Labor UASB Reaktor	10
Abbildung 4:EGSB Biobed© Schema (Biothane, 2002)	15
Abbildung 5: EGSB Reaktor Schaffhausen.....	15
Abbildung 6: C-Massenbilanz über die Silageperiode	20
Abbildung 7: N-Massenbilanz über die Silageperiode	20
Abbildung 8: TR-Massenbilanz über die Silageperiode.....	21
Abbildung 9: CSB-Massenbilanz über die Silageperiode	21
Abbildung 10: P-Massenbilanz über die Silageperiode	22
Abbildung 11: C-Massenbilanz über die Grasperiode	23
Abbildung 12: N-Massenbilanz über die Grasperiode	23
Abbildung 13: TR-Massenbilanz über die Grasperiode	24
Abbildung 14: CSB-Massenbilanz über die Grasperiode	24
Abbildung 15: P-Massenbilanz über die Grasperiode	25
Abbildung 16: Absolute TR-Bilanz der Grasraffinerie 2002	27
Abbildung 17: Prozentuale TR-Bilanz der Grasraffinerie 2002	27
Abbildung 18: Temperatur von EGSB Zu- und Ablauf.....	28
Abbildung 19: pH-Wert von EGSB Zulauf und Ablauf	28
Abbildung 20: VFA und Alkalinität von EGSB Zu- und Ablauf	29
Abbildung 21: Leitfähigkeit von EGSB Zu- und Ablauf	29
Abbildung 22: Konzentrationen von CH ₄ und H ₂ S im Biogas	30
Abbildung 23: Entwicklung der Feststofffraktionen im EGSB Reaktor.....	31
Abbildung 24: Entwicklung der organischen Fraktionen im EGSB Reaktor	31
Abbildung 25: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 1.2.2002	32
Abbildung 26: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 26.2.2002	32
Abbildung 27: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 27.3.2002	33
Abbildung 28: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 16.4.2002	33
Abbildung 29: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 6.5.2002	34
Abbildung 30: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 3.6.2002	34
Abbildung 31: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 9.7.2002	35
Abbildung 32: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 26.8.02	35
Abbildung 33: Hydraulische Verweilzeit (Tagesbilanzen).....	36

Abbildung 34: Entwicklung Abbau organischer Kohlenstoff OC (Tagesbilanzen)	36
Abbildung 35: Entwicklung Abbau CSB (Tagesbilanzen)	37
Abbildung 36: Entwicklung Abbau totaler Komponenten (Monatsbilanzen)	37
Abbildung 37: Entwicklung Abbau gelöster Komponenten (Monatsbilanzen)	37
Abbildung 38: Spezifische Gasausbeute EGSB, bezogen auf TOC Zulauf / TOC Abbau...	38
Abbildung 39: spezifische Gasausbeute EGSB, bezogen auf tCSB Zulauf / tCSB Abbau..	38
Abbildung 40: Raumbelastung EGSB, bezogen auf TOC _{zu} und tCSB _{zu}	39
Abbildung 41: spezifische Abbauleistung TOC _{abgebaut} /m ³ *d und tCSB _{abgebaut} /m ³ *d.....	39
Abbildung 42: Pelletsbelastung (Schlammbelastung) bezogen auf TOC _{zu} und TOC _{abgebaut}	39
Abbildung 43: Pelletsbelastung (Schlammbelastung) bezogen auf tCSB _{zu} und tCSB _{abgebaut}	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittliche Zusammensetzung der Schlemphen	8
Tabelle 2: Biogaspotential und Abbaubarkeit der Schlemphen	9
Tabelle 3: Chemische Hydrolyse der Proteinfraction von Grasschlempe	11
Tabelle 4: Durchschnittliche Zulaufkonzentrationen während Silage- und Grasperiode ...	17
Tabelle 5: Durchschnittliche Tagesbeschickung des EGSB	18
Tabelle 6: Durchschnittliche Leistungskennzahlen während Silage- und Grasperiode	19
Tabelle 7: SO ₄ -S Frachten der Silage- und Grasperiode.....	25
Tabelle 8: Durchschnittliche Zulauf- und Ablaufkonzentrationen des EGSB Reaktors	26
Tabelle 9: Prognostizierte Kennzahlen des EGSB für 2003	43

Abkürzungen

BES	Bioenergie Schaffhausen
BFE	Bundesamt für Energie
BHKW	Blockheizkraftwerk
B _R	Raumbelastung
BSE	Bovine Spongiforme Encephalopathie, Rinderwahnsinn
CHF	Schweizer Franken
EGSB	Expanded Granular Sludge Bed Reaktor
EU	Europäische Union
GES	Gemüseschlempe
GRS	Grasschlempe
GVO	Gentechnisch veränderte Organismen
GVS	Genossenschaftsverband Schaffhausen
HAc	Acetat
HCl	Salzsäure
HSW	Hochschule Wädenswil
IP	Integrierte Produktion
IR	Infrarot
NaOH	Natronlauge
P+D	Pilot und Demonstrationsanlage
SSF	Simultaneous Saccharification & Fermentation
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Bed
VFA	Volatile Fatty Acids
WKK	Wärme – Kraft Kopplung
η_{hy}	Hydrolysegrad
Δ	Differenz
$\varnothing$	Durchmesser, arithmetischer Mittelwert

Messparameter

BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf (in 5 Tagen)
CH ₄	Methangehalt im Gas
CO ₂	Kohlendioxidgehalt im Gas
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
tCSB	Totaler Chemischer Sauerstoffbedarf
gCSB	Gelöster Chemischer Sauerstoffbedarf
pCSB	Partikulärer Chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	Gelöster (dissolved) Organischer Kohlenstoff
GUS	Gesamte Ungelöste Stoffe
H ₂ S-S	Schwefel als Schwefelwasserstoff
tN	Totaler Stickstoff
gN	Gelöster Stickstoff
gN _{org}	Gelöster Organischer Stickstoff
NH ₄ -N	Ammonium Stickstoff
NO ₃ -N	Nitrat Stickstoff
OTR	Organischer Anteil des Trockenrückstandes
pH	pH Wert
POC	Partikulärer Organischer Kohlenstoff
PO ₄ -P	Phosphat Phosphor
tPO ₄ -P	Totaler Phosphor
gPO ₄ -P	Gelöster Phosphor
pPO ₄ -P	Partikulärer Phosphor
SO ₄ -S	Sulfat Schwefel
TOC	Totaler Organischer Kohlenstoff
TR	Trockenrückstand

Einheiten

d	Tag	ml	Milliliter
g	Gramm	mS	Millisiemens
ha	Hektare	mt	Monat
kg	Kilogramm	Nm ³	Normkubikmeter
m	Meter	ppm	Parts per Million
meq	Milliaequivalent	Q	Fluss
min	Minuten	Q _{rec}	Rezirkulationsfluss
Mio	Million, 10 ⁶	°C	Grad Celsius

1. Projektumfeld „Bioenergie, Protein und Fasern aus Gras“

Die Firma 2B Biorefineries hat im Jahr 2000 für die Bioenergie Schaffhausen AG die erste Bioraffinerie der Schweiz zur Verarbeitung von Gras erstellt. Die Produkte der ersten Betriebsphase 2001 – 2002 sind Energie (Biogas / Wärme / elektrischer Strom) und technische Fasern. In einer zweiten Phase (ab 2003) kann zusätzlich ein Proteinkonzentrat hergestellt werden. Bei Volllast werden jährlich 4'000 Tonnen Trockensubstanz aus Wiesen-gras verarbeitet. Dies entspricht je nach Herkunft des Grases (IP oder Ökoflächen) einer Fläche von ca. 600 ha. Zusätzlich besteht Kapazität für ca. 1'000 Jahrestonnen Gras von Bahn- und Strassenböschungen (Hesselmann, 2001).

In einem ersten Verfahrensschritt werden nach einem mechanischen Aufschluss des Grases Fasern gewonnen. Der zweite Verfahrensschritt separiert und konfektioniert das Proteinkonzentrat. In einem dritten Schritt wird aus den verbleibenden, mehrheitlich gelösten Grasinhaltsstoffen Biogas hergestellt (Abbildung 1). Die Fasern werden vor allem als Isolationsmaterial (Wärme und Schall), Baumaterial und für Faserverbundwerkstoffe abgesetzt. Der Markt für das Proteinkonzentrat (ohne GVO und BSE Risiken) liegt in der Tierfutterindustrie z. B. an Stelle von Sojaschrot für die Hühner-, Rinder- und Schweinefütterung. Abnehmer für das Biogas aus der Bioraffinerie ist die ETAWATT Schaffhausen AG, die als Contractor eine Wärme-Kraft-Kopplungsanlage (WKK) betreibt. Die Wärme wird vollständig als Prozessenergie in der Anlage verwendet. Der Strom wird als Ökostrom über die Städtischen Werke Schaffhausen/Neuhausen und die Swiss Citypower AG über bereits existierende Ökostrombörsen am Markt verkauft (Baier & Grass, 2001).

Das Projekt erschliesst eine neue Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse und Anbaufläche zur Herstellung von hochwertigen und vermarktbareren Produkten. Herstellung und Verwendung der Produkte folgen dem Leitbild der Nachhaltigkeit.

Aus energiewirtschaftlicher Sicht überzeugt vor allem der Umstand, dass nachwachsende Rohstoffe dezentral in erneuerbare Energie umgewandelt werden. Aus volkswirtschaftlicher Sicht trägt das Projekt zur Erhaltung von Arbeitsplätzen in der Agrarwirtschaft bei und ermöglicht einen Abbau landwirtschaftlicher Überschüsse bei sinnvoller Nutzung von Extensiv und Ökoflächen. Die Produktion und Vermarktung eines pflanzlichen Proteins, welches frei von GVO und BSE Risiken ist, reduziert die Importe und die Verwendung von Tierfutter, das teilweise heutigen Hygieneanforderungen nicht entspricht. Die Rohstoffe werden über kurze Distanzen angeliefert, was geringe Aufwendungen und Transportbelastungen bedeutet. Aus umweltpolitischer Sicht ist hervorzuheben, dass das Projekt eine sehr gute Ökobilanz aufweist (Dinkel & Theune, 2000) welche zeigt, dass Strom aus Gras im Vergleich zum Schweizer und EU Strom Mix eine sehr umweltverträgliche Stromgewinnungsmethode ist.

Die Trägerschaft (Aktionäre) der Bioenergie Schaffhausen AG besteht aus:

- Genossenschaftsverband Schaffhausen (GVS), (Unternehmen der Agrarwirtschaft)
- Landwirten (Rohstoff Lieferanten)
- 2B Biorefineries AG, (Technologieunternehmen für Biomasse und Bioenergie)
- ETAWATT Schaffhausen AG, (Generalunternehmung für Energiedienstleistungen, Contracting)
- Städtische Werke Schaffhausen / Neuhausen, (Abnehmer & Verteiler von Energie)
- Faserindustrielle
- sowie weiteren Aktionären aus dem Geschäftsumfeld.

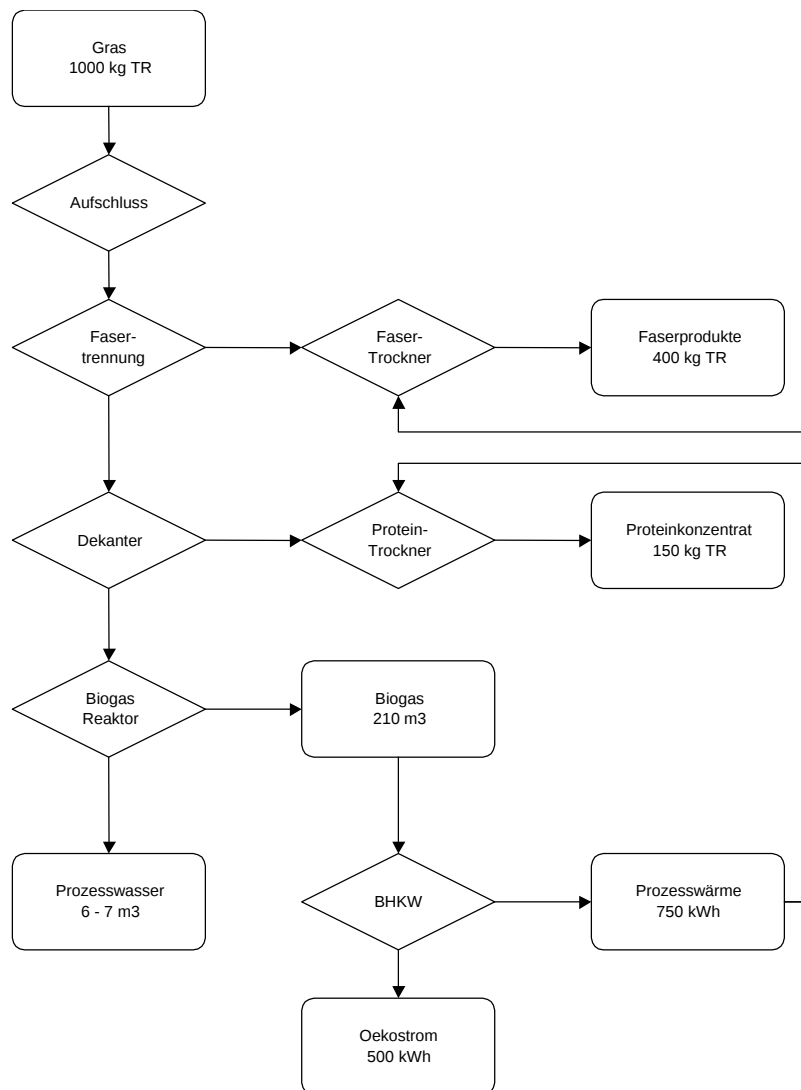


Abbildung 1: Verfahrensfliessbild Grasraffination

Das Projekt wird vom BFE Bundesamt für Energie als Demonstrationsanlage unterstützt. Die HSW Hochschule Wädenswil ist durch die Arbeitsgruppe Umweltbiotechnologie an Entwicklungsarbeiten im Bereich der Biogasproduktion beteiligt (Delavy & Baier, 2002). Der Standort der Anlage liegt im Industriegebiet in Schaffhausen Ebnat.

Die Investitionssumme für die Anlagen beträgt CHF 6.3 Mio. Die Rendite auf dem Eigenkapital wird bei Volllastung ca. 10 % betragen. Der Erlös aus dem Verkauf der Endprodukte beträgt anfänglich ca. CHF 2 Mio. und bei voller Auslastung über CHF 3 Mio pro Jahr.

Das Monitoringprogramm der Biogasanlage ist ein Teilprojekt des vom BFE unterstützten P+D Projektes und umfasst

- ⊕ die Bestimmung des Biogaspotentials und der anaeroben Abbaubarkeit von Grasschlempe in kontrollierten Laborversuchen sowohl im anaeroben Batch-Verfahren als auch unter realitätsnahen Bedingungen in einem UASB Reaktor und
- ⊕ die tägliche – wöchentliche Beprobung des technischen Reaktors in Schaffhausen (P+D Anlage) sowie die Erstellung von Massenbilanzen und die Berechnung von Leistungskenngrößen für die erste Betriebsphase.

2. Zielsetzungen

Das durch die HSW Hochschule Wädenswil durchgeführte Monitoringprogramm beinhaltet folgende Zielsetzungen:

Laborstudien:

- Bestimmung der mesophil anaeroben Abbaubarkeit von Grasschlempen (Produktionsabwasser nach Faser- und Proteintrennung) unterschiedlicher Herkunft (Frischgras, Silage).
- Aufdecken allfälliger Nährstofflimitationen der Substrate.
- Aufdecken möglicher Hemmungen des anaeroben Abbaus.
- Bestimmen des mesophilen Biogaspotentials.
- Beurteilung der Eignung des UASB Verfahrens zur anaeroben Behandlung von Grasschlempe.

Monitoring des technischen Reaktors:

- Verifikation der Labordaten für die Abbaubarkeit und das Biogaspotential.
- Bilanzierung von Kohlenstoff und Stickstoff über längere Betriebsperioden von mehreren Monaten.
- Ermittlung der Abhängigkeit der Reaktorleistung von der Substratqualität (Silage oder Frischgras als Rohmaterial für die Grasraffination).
- Ermittlung gesicherter Leistungskenndaten für den biologischen Abbau und Umsatz von Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen sowie für die Biogasproduktion als Grundlage für die betriebliche Optimierung.
- Beschreiben des Verhaltens des anaeroben Pelletschlammes gegenüber dem Substrat „Grassaft“.
- Beschreiben des Verhaltens und des anaeroben Abbaus der mehrheitlich ungelösten Proteinfraktion während der ersten Betriebsphase ohne Proteinabscheidung.
- Abschätzen resp. aufdecken einer allfälligen Akkumulation von Feststoffen im Reaktor.

3. Laborversuche

3.1 Anaerobe Abbaubarkeit von Schlempe aus der Bioethanolproduktion

Das Biogaspotential wurde in 500 ml Batchansätzen bei 35 – 37 °C ermittelt. Mehrere Parallelansätze wurden mechanisch gerührt, der pH Wert wurde manuell im Bereich von 7.0 – 7.5 korrigiert. Während einer Versuchsdauer von 17 – 38 Tagen wurde die Gasproduktion via Überdruckmessung verfolgt und auf Normalbedingungen umgerechnet.

Parallelversuche mit Nährstoffsupplementierung erlaubten die Aufdeckung von Limitationen. Durch Verdünnungsansätze der konzentrierten Originalschlempen konnten Substratinhibitionen ermittelt werden.

Die anaerobe Abbaubarkeit von zwei Substraten (Schlempe aus der Verarbeitung von Gras resp. Gemüseabfällen, Tabelle 1) wurde in einem kontinuierlich betriebenen UASB Reaktor ermittelt. Das Pelletvolumen betrug 4000 ml bei einem Gesamtvolumen von 8000 ml. Der UASB Reaktor wurde bei 37 °C betrieben, die Aufstiegsgeschwindigkeit betrug 1-2 m³ m⁻² h⁻¹. Der pH-Wert wurde kontinuierlich bei 7.1 < pH < 7.5 geregelt. Die Biogasmenge wurde kontinuierlich erfasst, die Bestimmung der CO₂ Konzentration erfolgte mehrmals punktuell. Die Versuche zur Ermittlung der Abbaubarkeit und des Biogaspotentials im UASB Reaktor erstreckten sich über je 14 Wochen mit den beiden Substraten „Grasschlempe, GRS“ und „Gemüseschlempe, GES“. Während der beiden Substratperioden wurde die Raumbelastung des UASB Reaktors schrittweise von 3-5 kg CSB m³ d⁻¹ auf über 13 kg CSB m³ d⁻¹ erhöht (Tabelle 2). Die hydraulischen Verweilzeiten betrugen 2.3 – 4.8 Tage.

Tabelle 1: Durchschnittliche Zusammensetzung der Schlempen

		Grasschlempe (GRS)	Anteil am Totalwert [%]	Gemüseschlempe (GES)	Anteil am Totalwert [%]
TR	[g/l]	30.0	100	14.9	100
oTR	[g/l]	24.4	81	13.2	89
TOC	[g/l]	14.2	100	7.1	100
DOC	[g/l]	10.4	73	3.2	45
POC	[g/l]	3.8	27	3.9	55
tCSB	[g/l]	36.8	100	19.6	100
BSB ₅	[g/l]	14.3	39	5.6	29
tN	[g/l]	0.670	100	0.200	100
NH ₄ -N	[g/l]	0.015	2.2	0.015	7.5
NO ₃ -N	[g/l]	0.058	8.7	0.039	19.5
tPO ₄ -P	[g/l]	0.380	-	0.08	-
C : N : P	-	37 : 2 : 1		89 : 2.5 : 1	
pH	[-]	4.0		4.0	

Beide Schlempen wiesen einen hohen organischen Anteil auf, die aerobe biologische Abbaubarkeit (BSB₅) hielt sich mit 39% (GRS) resp. 29% (GES) in Grenzen. Die Gehalte an Stickstoff und Phosphor liessen keine Limitation dieser Elemente erwarten. Der gelöste Anteil der organischen Substanz lag in der Grasschlempe mit 73% relativ hoch, in der Gemüseschlempe mit 45% eher tief.

Im Batchversuch zeigte die Grasschlempe keine Stickstofflimitation, die Gasausbeute bleibt sich bei N-Zugabe gleich. Ausgeprägt war hingegen die Substrathemmung, bei einer 1:4 Verdünnung der Originalschlempe war ein deutlicher Anstieg der spezifischen Biogasproduktion [$\text{m}^3/\text{kg TOC}$] zu verzeichnen (Tabelle 2: Batchversuche). Diese Substrathemmung war vermutlich auf den hohen gelösten Kohlehydratanteil zurück zu führen. Eine bei 4.7 bar thermisch vorhydrolysierte Schlempe zeigte aufgrund der spezifischen Biogasproduktion keine Substrathemmung mehr.

Tabelle 2: Biogaspotential und Abbaubarkeit der Schlempen

Batchversuche					
	Gasertrag			Abbau	
Substrat	[m^3/m^3 Substrat]	[$\text{m}^3/\text{kg TOC}$]	[% CO_2]	[% TOC]	[% tCSB]
GRS	6.2	0.46	n.e.	n.e.	n.e.
GRS + NH_4	6.5	0.48	n.e.	n.e.	n.e.
GRS, 1:4 verdünnt	4.0	1.15	n.e.	n.e.	n.e.
GRS, 4.7 bar	14	1.16	n.e.	n.e.	n.e.
GRS, 4.7 bar, 1:4	3.7	1.17	n.e.	n.e.	n.e.
UASB Versuche					
	Gasertrag			Abbau	
Substrat, Raumbelastung	[m^3/m^3 Substrat]	[$\text{m}^3/\text{kg CSB}$]	[% CO_2]	[% TOC]	[% tCSB]
Grasschlempe					
GRS, 6.1 $\text{kg CSB m}^{-3} \text{d}^{-1}$	14.3	0.53	36	79	80
GRS, 8.1 $\text{kg CSB m}^{-3} \text{d}^{-1}$	24.4	0.75	36	83	79
GRS, 10.3 $\text{kg CSB m}^{-3} \text{d}^{-1}$	16.6	0.50	34	84	79
GRS, 13.6 $\text{kg CSB m}^{-3} \text{d}^{-1}$	20.8	0.64	38	73	63
Gemüseschlempe					
GES, 3.5 $\text{kg CSB m}^{-3} \text{d}^{-1}$	7.1	0.52	35	90	90
GES, 4.8 $\text{kg CSB m}^{-3} \text{d}^{-1}$	15.8	0.69	36	88	84
GES, 7.1 $\text{kg CSB m}^{-3} \text{d}^{-1}$	14.8	0.64	35	82	83
GES, 10.2 $\text{kg CSB m}^{-3} \text{d}^{-1}$	15.0	0.50	32	82	85
GES, 13.6 $\text{kg CSB m}^{-3} \text{d}^{-1}$	11.3	0.38	35	62	69

n.e.: nicht ermittelt

Daten aus (Diem, 2000) und (Niklaus, 2000)

Im kontinuierlichen UASB Versuch wurde über einen weiten Bereich der CSB Raumbelastung ein hoher Abbaugrad des organischen Anteils sowohl mit Grasschlempe (ca. 80%, Abbildung 2) als auch mit Gemüseschlempe (85 – 90%, Abbildung 3) erreicht. Die spezifischen Gaserträge lagen konstant um $0.6 \pm 0.1 \text{ m}^3 \text{ Biogas} / \text{kg CSB}$ mit einem CH_4 Gehalt von 62-68 % (Tabelle 2). Erst bei hohen Raumbelastungen über $13 \text{ kg CSB} / \text{m}^3 \text{ d}$ trat ein leichter Rückgang des Abbaugrades auf, ausgeprägter bei der Gemüseschlempe als bei der Grasschlempe.

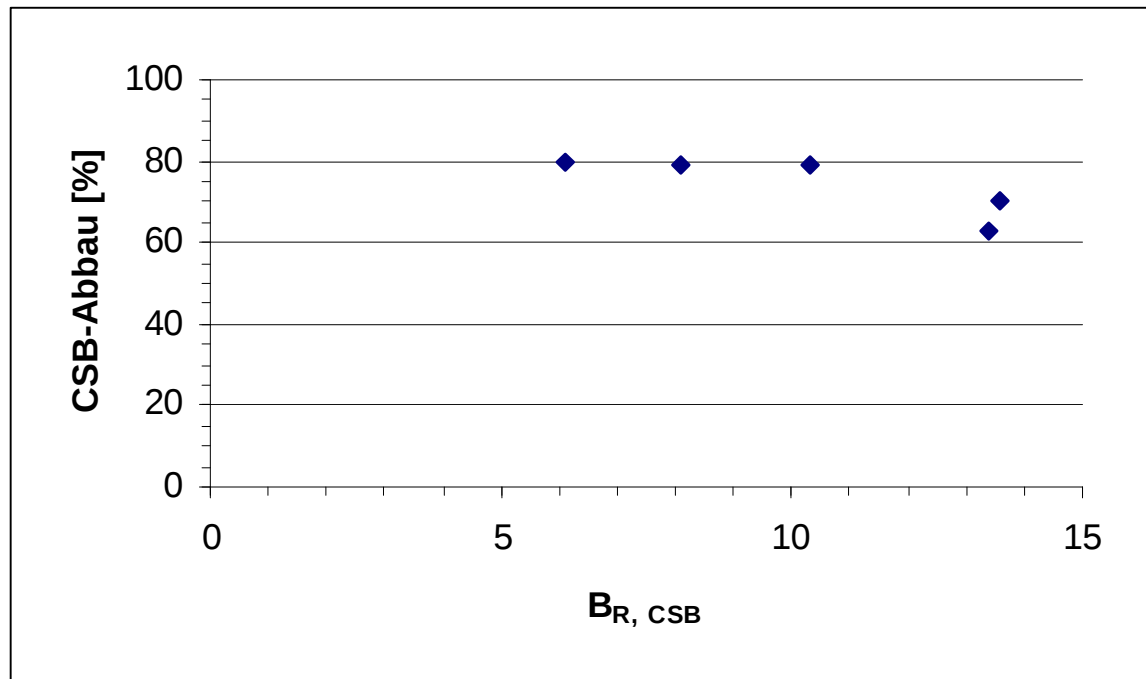


Abbildung 2: Abhängigkeit des CSB-Abbaus von der Raumbelastung bei der Gras-schlempe im Labor UASB Reaktor

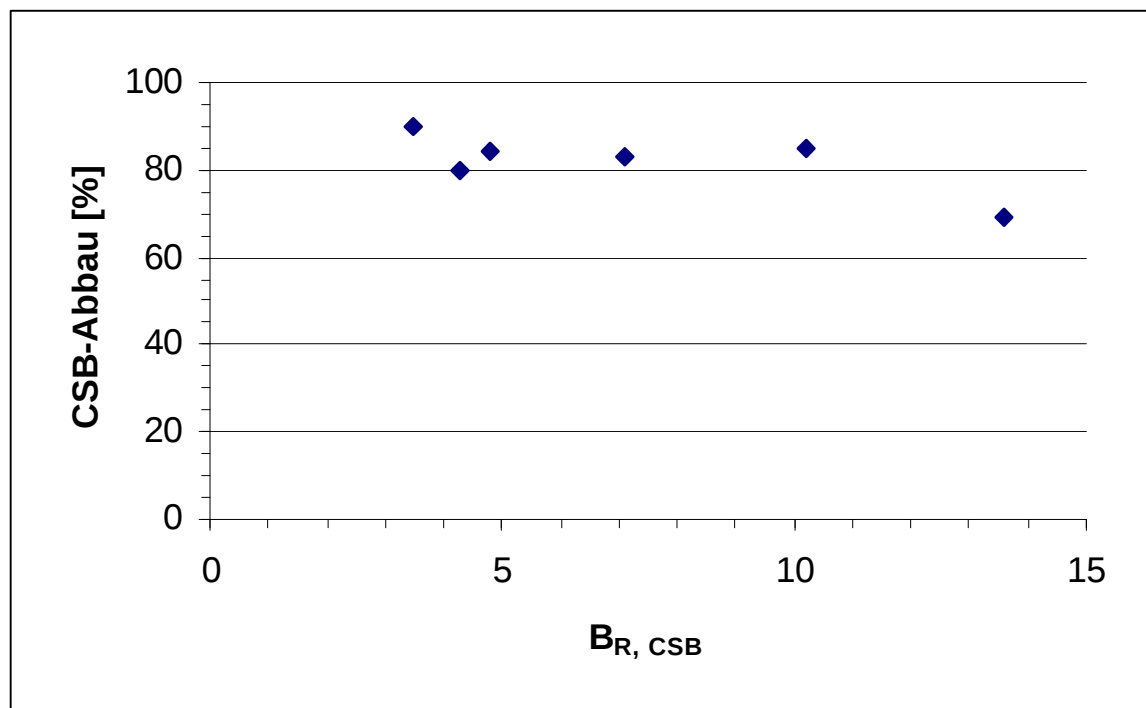


Abbildung 3: Abhängigkeit des CSB-Abbaus von der Raumbelastung bei der Gemüse-schlempe im Labor UASB Reaktor

3.2 Chemische Hydrolyse der Proteinfraktion

Die thermisch-alkalische und thermisch-saure Hydrolyse der Proteinfraktion von Grasschlempen wurde im Labormassstab mit der Zielsetzung untersucht, eine allfällige Vorbehandlung während der 1. Betriebsphase ohne Proteingewinnung zu betreiben. Als Parameter für die Proteinhydrolyse diente der Hydrolysegrad η_{hy} als Mass für die Zunahme der gelösten CSB Fraktion gemäss:

$$\eta_{hy} = 100 * (sCSB_t - sCSB_0) / pCSB_0$$

η_{hy} : Hydrolysegrad [%]

sCSB₀: gelöster CSB zu Versuchsbeginn, [mg/l]

sCSB_t: gelöster CSB zu Versuchsende, [mg/l]

pCSB_t: partikulärer CSB zu Versuchsende, [mg/l] (= tCSB – sCSB₀)

Tabelle 3: Chemische Hydrolyse der Proteinfraktion von Grasschlempe

Reaktions- bedingungen	Temp.	Reaktions- zeit	pH		CSB				η_{hy}
			Vor	nach	tCSB	pCSB ₀	sCSB ₀	sCSB _t	
	[°C]	[min]	[-]	[-]	[g/l]	[g/l]	[g/l]	[g/l]	[%]
Ohne Chemikalien	80	60	7.9	7.8	18.7	16.6	2.1	5.85	22
HCl 1.2 M	100	60	0.4	0.7	18.75	17.3	1.45	6.49	29
HCl 1.7 M	121	20	0.6	0.9	18.75	17.3	1.45	8.98	44
NaOH 0.5 g/l	32	1440	10	9.6	4.6	4.1	0.5	0.6	0
NaOH 1 g/l	100	60	13.7	12.9	18.75	17.3	1.45	8.27	39
NaOH 2 g/l	121	20	14	13.6	18.75	17.3	1.45	11.62	59
NaOH 5 g/l	80	60	14	14	18.7	16.6	2.1	7.94	35
NaOH 10 g/l	121	20	14	14	18.75	17.3	1.45	13.15	66

Die saure Hydrolyse der Proteinfraktion führte nur bei sehr hohen Dosierungen und Temperaturen zu einem signifikanten Resultat. Die alkalische Vorbehandlung hingegen führte teilweise zu hohen Hydrolysegraden von über 60%. Der rein alkalische Aufschluss bei Zimmertemperatur war nicht erfolgreich, der rein thermische Aufschluss bei 80 °C erreichte eine 22%ige Hydrolyse des partikulären Materials (Tabelle 3). Hohe Dosierungen von Natronlauge über 2 g/l führten kaum zu einem erhöhten Hydrolysegrad. Die Temperatur erwies sich als wichtiger Einflussfaktor, die höchsten Hydrolysegrade wurden bei 100 – 121 °C erreicht.

Mit alkalisch hydrolysiertem Substrat (NaOH 5 g/l, 80 °C, 60 min) wurden anaerobe Abbauversuche im mesophilen (37 °C) und im thermophilen (55 °C) Temperaturbereich durchgeführt. Dabei konnte zwischen unbehandeltem und behandeltem Substrat weder ein schnellerer initialer Umsatz des CSB noch ein weitergehender Abbau des hydrolysierten Materials beobachtet werden. Die Unterschiede der anfänglichen Abbaugeschwindigkeit sowie des totalen Abbaus zwischen mesophiler und thermophiler Temperatur waren nicht signifikant.

3.3 Schlussfolgerungen aus Laborstudien & Pilotierung

Als Schlempen werden Produktionsrückstände aus der Grasraffination (Fasergewinnung, Proteingewinnung) bezeichnet. Diese Schlemphen sind anaerob gut abbaubar und grundsätzlich für eine Biogasgewinnung geeignet.

Bei der anaeroben Vergärung und Biogasgewinnung von Schlemphen aus der Grasraffination ist nicht mit einer Nährstofflimitation durch N oder P zu rechnen.

Unverdünnte Schlemphen können Substrathemmungen verursachen. Eine Behandlung in Pfropfströmern ohne Rezirkulation, SBR oder Batchreaktoren ist ungünstig. Rohschlemphen sind über Rezirkulationsleitungen oder Misch tanks zu verdünnen.

Der Rohstoff der Bioethanolgewinnung Gras weist ein Nährstoffverhältnis auf, das dem für die Vergärung optimalen Nährstoffverhältnis (C:N:P) von 100-200:5:1 entspricht. Das veränderte Nährstoffverhältnis der Schlempe von durchschnittlich 37:2:1 ist bedingt durch die Produktion von Ethanol (C-Verlust) und die Proteingewinnung (N-Verlust) bei der Grasfermentation. Wird das Verfahren der Grasfermentation abgeändert, muss mit einem veränderten Nährstoffverhältnis der Schlempe gerechnet werden. Da in der Anlage Schaffhausen eine Fasergewinnung ohne Produktion von Bioethanol und in einer ersten Phase ohne Proteingewinnung geplant ist, sind dort höhere C- und N-Anteile in der Schlempe zu erwarten.

In den Batchversuchen konnten Hemmungen in der Methanogenese festgestellt werden, es handelte sich vermutlich um Substrathemmungen durch gelöstes organisches Material. Der pH-Wert wurde vor- und während der Batchversuche mit NaOH auf den neutralen Bereich eingestellt. Die maximale Konzentration an Na-Ionen lag bei Versuchsende bei 1.1 g Na/l, weit unterhalb bekannter Na-Hemmkonzentrationen von 6 - 8 g/l auf. Hemmungen durch den pH-Wert bzw. durch Na-Ionen können deshalb ausgeschlossen werden. Ebenfalls auszuschließen ist eine Hemmung durch zu hohe $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ – Konzentrationen. Die bei den Schlemphen festgestellte $\text{NH}_4\text{-N}$ – Konzentration liegt durchwegs < 40 mg N/l, die während der kontinuierlichen Reaktorversuche im UASB Reaktor gemessenen $\text{NH}_4\text{-N}$ - Konzentrationen liegen bei maximal 500 mg N/l, also deutlich unter dem anaerob hemmenden Bereich von 1000 – 3000 mg $\text{NH}_4\text{-N}$ /l.

Die Konzentrationen an organischen Säuren sind ein Hinweis auf die Stabilität eines Vergärprozesses. Bei leichtabbaubaren Ausgangsstoffen kann es leicht zu einem Überangebot an organischen Säuren kommen, das die Abbaukapazität der Methanbakterien übersteigt und durch einen negativen Rückkopplungseffekt zur weiteren Versäuerung im Reaktor führt. Die Hemmung der Methanogenese tritt ab Acetat-Konzentrationen ab 2000 mg/l bzw. ab Propionatkonzentrationen ab 1000-2000 mg/l ein. Leicht erhöhte Säurekonzentrationen von gegen 1500 mg/l HAc-Aequivalenten traten im UASB-Reaktor während dem Betrieb mit hoher Raumbelastung (13.6 kg CSB m³ d⁻¹) auf. Bei tieferen Raumbelastungen waren Säurekonzentrationen von < 500 mg/l HAc-Aequivalente gefunden. Eine Produkthemmung durch organische Fettsäuren kann daher ausgeschlossen werden (Scheurer, 2000).

Für die Schlemphen der Anlage Schaffhausen (keine Bioethanolgewinnung, keine Proteingewinnung in der 1. Betriebsphase) ist mit höheren TOC und tN (und $\text{NH}_4\text{-N}$ im Reaktor) Konzentrationen zu rechnen.

Bei Raumbelastungen von 10 – 12 kg CSB / m^3 d wird im UASB Reaktor ein stabiler Abbaugrad von 80% des organischen Materials erreicht. Raumbelastungen von über 15 kg CSB / m^3 d liegen im Bereich des Möglichen.

Im stabilen Betrieb kann mit einem hohen spezifischen Biogasertrag von 0.5 – 0.65 Nm^3 / kg CSB_{zu} gerechnet werden (Methangehalt: 65%).

Mit ähnlichen Substraten werden Abbauwerte zwischen 65 und 95 % erreicht (Campos et al., 1986; Cronin & Lo, 1998; Driessen et al., 1994; Kalyuzhnyi et al., 1998). Die mit Grasschlemphen erzielten Abbaugrade liegen eher im oberen Bereich.

Die Gaserträge in den kontinuierlichen Versuchen sind mit 0.38 – 0.75 m^3 Gas kg^{-1} CSB_{zu} im Vergleich mit in der Literatur gefunden Werten hoch. Mit einer Schlempe aus der Zuckerrohrverarbeitung mit vergleichbarem CSB-Gehalt und Raumbelastung wurde beispielsweise ein durchschnittlicher Gasertrag von 0.37 m^3 Gas kg^{-1} CSB_{zu} erzielt (Craveiro et al., 1986). Mit anderen vergleichbaren Abwässern wurden Gaserträge zwischen 0.39-0.43 m^3 Gas kg^{-1} CSB_{zu} (Williams et al., 1999) bzw. 0.31 m^3 Gas kg^{-1} CSB_{zu} (Gulmez et al., 1998) erzielt.

Bei einem hohen Anteil ungelöster Stoffe im Rohsubstrat (TOC:DOC < 1.8) ist im UASB Reaktor mit einer Verschlammung des Pelletbereichs zu rechnen. Die anaerobe Umsetzung des ungelösten Anteils bedingt längere Verweilzeiten von 5 – 10 (oder mehr) Tagen.

Kann ein tiefer Gehalt an ungelösten Stoffen im Substrat nicht gewährleistet werden, so drängt sich eine vorgeschaltete Hydrolyse oder ein alternativer Reaktortyp (ADFF) auf.

Der erhöhte Anteil an ungelösten organischen Stoffen (Proteine bei fehlender Proteingewinnung in der ersten Betriebsphase) ist biologisch nur langsam hydrolysierbar. Eine saure thermische Hydrolyse ist wenig Erfolg versprechend. Eine alkalisch-thermische Hydrolyse ist machbar, sie führt zu einem Hydrolysesubstrat, welches anaerob unwesentlich besser abbaubar ist.

Der hohe Anteil an ungelösten Stoffen (TOC-DOC – Verhältnis) in gewissen Schlemphen führte zu einer Verschlammung der Pellets. Diese Verschlammung kann auch im großtechnischen Massstab auftreten. Sind für die großtechnische Anlagen Schlemphen mit einem hohen Anteil an ungelösten Stoffen zu erwarten, müsste die anaerobe Behandlung der Schlemphen auf einem alternativen Reaktortyp oder allenfalls eine Vorbehandlung der Schlemphen in Erwägung gezogen werden (Souza, 1986). Bei der vorgegebenen Schlemphenzusammensetzung mit hohem CSB- Anteil und hohem Gehalt an ungelösten Stoffen ist ein Down-flow Anaerobfilter zu empfehlen. Eine anaerobe Vorhydrolyse der Proteinfraction ist an lange Aufenthaltszeiten gebunden.

Aufgrund seines hohen N- und P- Gehaltes eignet sich anaerob behandelte Schlempe als landwirtschaftlicher Dünger. Ein hoher Salzgehalt kann diese Verwertung einschränken.

4. P+D Anlage der Bioenergie Schaffhausen AG

4.1 Produktion von Fasern und Protein aus Gras

Das durch die 2B Biorefineries entwickelte Verfahren zur Raffination von Gras (und weiteren organischen Rohstoffen) beinhaltet die Gewinnung der Produkte:

- Ethanol (Industriealkohol, Energieträger)
- Faserstoffe (Isolationsmaterial, Faserrohstoff),
- Proteinkonzentrat (Viehfutter) und
- Biogas (Energieträger).

Beim entwickelten Verfahren wird das Rohmaterial Gras mechanisch-thermisch aufgeschlossen und in eine Faserfraktion und eine Flüssigfraktion aufgeteilt. Die Flüssigfraktion wird durch den Einsatz von Hefen und von Enzymen von *Trichoderma reesei* gleichzeitig einer enzymatischen Verzuckerung der Cellulose mit anschliessender Ethanolproduktion durch Hefegärung unterzogen (SSF Simultaneous Saccharification and Fermentation). Nach destillativer Entfernung des Ethanols und mechanischer Abtrennung der Proteinfraction (Grasproteine und Hefe) fällt als Restprodukt eine Schlempe mit einem durchschnittlichen Trockenrückstand (TR) von 3% an.

Die erste grosstechnische Grasraffinerie der Schweiz in Schaffhausen verzichtet aufgrund der geringen Wertschöpfung auf die Produktion von Ethanol. In einer ersten Phase (2002 – 2003) werden die Produktlinien „Faserstoffe“ und „Biogas“ verwirklicht. In einer zweiten Phase (ab 2004) ist die Inbetriebnahme der Produktlinie „Proteinkonzentrat“ vorgesehen.

4.2 Produktion von Biogas aus Grasschlempe

Die Biogasanlage der Grasraffinerie Schaffhausen setzt sich aus einer Flüssiglinie und einer Gaslinie zusammen. Die Flüssiglinie besteht aus Puffertank und EGSB Biobed® – Reaktor (Abbildung 4). Die Gaslinie beinhaltet einen Gaswäscher (Entschwefler) sowie einen Foliengasspeicher (200 m³).

Der Puffertank besitzt ein Maximalvolumen von 150 m³, er wird mit einem minimalen Füllstand von 30 m³ gefahren. Der Puffertank wird durch ein Tauchrührwerk intervallmässig gerührt. Der pH Wert wird nicht kontrolliert um eine saure Hydrolyse v.a. der ungelösten Proteinfraction zu ermöglichen. Die CO₂-reiche und leicht geruchsbelastete Abluft des Puffertanks wurde ab Mai 2002 dem Biogas zur Verbrennung beigemischt.

Als Biogasreaktor ist ein Biobed EGSB (Expanded Granular Sludge Bed) Reaktor mit 570 m³ Flüssigvolumen installiert ($\varnothing = 6.8$ m, $h = 15.6$ m, Abbildung 5). Der Reaktor ist mit einer kontinuierlich betriebenen Umwälzung ($Q_{\text{rec}} = 80$ m³/h) ausgerüstet. Zulaufendes Substrat ab Puffertank wird unten in die Rezirkulation gespiesen und verdrängt pelletfreies Abwasser im oberen Reaktorteil.

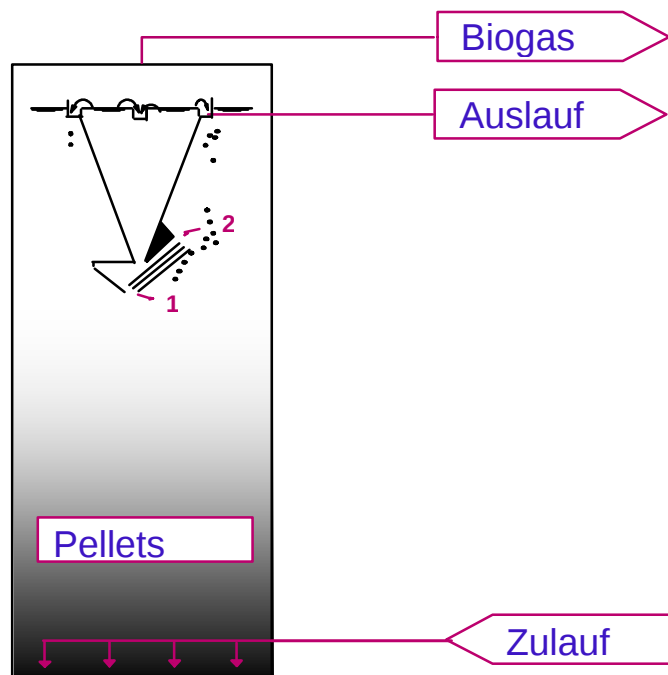


Abbildung 4:EGSB Biobed© Schema (Biothane, 2002)

- 1: Schlamm – Wasser Trennzone
2: Entgasungszone



Abbildung 5: EGSB Reaktor Schaffhausen

- 1: EGSB Reaktor
2: Rezirkulation
3: Puffertank
4: Gaswäscher / Entschwefler
5: Gasfackel

5. Monitoring der P+D Biogasanlage

5.1 Methoden

Die Systemgrenzen der Massenbilanzen für flüssige Stoffströme liegen beim Ausgang Versäuerungstank AT und Auslauf Biogasreaktor EGSB. Für gasförmige Stoffe liegt die Systemgrenze beim Eingang des Blockheizkraftwerkes BHKW.

Die Kohlenstoffbilanz der Biogasstufe basiert auf der Elementaranalyse „C“ als TOC (elementar TOC+N Analyser, katalytische Verbrennung bei 800 °C, IR Detektion von CO₂). Der gelöste Anteil des Kohlenstoffs DOC ist definiert als Kohlenstoffanteil im 20 µm Filtrat, der partikuläre Anteil POC als Kohlenstoffanteil im 20 µm Retentat. CO₂ im Biogas wurde über Adsorption in Lauge manometrisch ermittelt (Testort).

Die Stickstoffbilanz der Biogasstufe basiert auf der Elementaranalyse „N“ als Gesamtstickstoff tN (elementar TOC+N Analyser, katalytische Verbrennung bei 800 °C, IR Detektion von NO₃) sowie der photometrischen Bestimmung der gelösten, ionischen Komponenten NH₄-N (Dr. Lange LCK303), NO₃-N (Dr. Lange LCK339) und NO₂-N (Dr. Lange LCK341) im 0.45 µm Filtrat. Die Komponenten „Partikulärer Stickstoff, pN“ und „gelöster organischer Stickstoff gNorg“ wurden rechnerisch ermittelt.

Die Parameter Trockenrückstand TR, organischer Anteil oTR und Aschegehalt wurden gravimetrisch nach Trocknung (IR, 105 °C) resp. Veraschung (450 °C, 12 h) ermittelt.

Der chemische Sauerstoffbedarf CSB wurde photometrisch in Küvettentests (Dr. Lange LCK314, LCK414) ermittelt, der gelöste CSB ist definiert als Anteil im 20 µm Filtrat, der partikuläre CSB als Anteil im 20 µm Retentat.

Phosphor wurde als PO₄-P resp. als Gesamtphosphor photometrisch mittels Küvettentests (Dr. Lange LCK348) ermittelt. Schwefel wurde als SO₄-S photometrisch mittels Küvettentests (Dr. Lange LCK353) ermittelt.

5.2 Betriebsperioden

Das erste Betriebsjahr des EGSB Reaktors war gekennzeichnet durch 3 unterschiedliche Betriebsperioden hinsichtlich der Beschickung und der Substratherkunft. Es wurde unterschieden zwischen;

Einfahrperiode	Oktober 2001 – Januar 2002 Reaktor Start-up, unregelmässige Beschickung Optimierung der hydraulischen Aggregate und der Gaslinie
Silageperiode	Februar – Mai 2002 Betrieb mit 100% Grassilage
Grasperiode	Mai – September 2002 Betrieb mit 81 Gras, 19% Grassilage

Für das Monitoring, die Bilanzierung und die Ermittlung der Leistungskennzahlen wurden ausschliesslich Daten der Silageperiode und der Grasperiode betrachtet.

5.3 Substrate: Zusammensetzung & Menge

Die beiden Substrate „Grassaft Silage“ und „Grassaft Frischgras“ unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Gesamtbelastung mit organischem Material, mit Gesamtstickstoff und Gesamtphosphor wenig (Tabelle 4). Grassaft aus Silagegras weist leicht höhere Konzentrationen an CSB und Stickstoff auf. Signifikant ist der generell höhere Anteil der gelösten Komponenten (DOC, gCSB und gN_{org} resp. NH₄-N) an der Gesamtkonzentration (TOC, tCSB, tN) im Grassaft aus Silage. Dies ist zurück zu führen auf die vorgeschaltete Graslagerung in milchsaurer Silage und die damit einhergehende saure Hydrolyse von organischem Material.

Tabelle 4: Durchschnittliche Zulaufkonzentrationen während Silage- und Grasperiode

		Silageperiode (100% Silage)	Anteil am Totalwert [%]	Grasperiode (81%Gras und 19%Silage)	Anteil am Totalwert [%]	Basis Dimensio- nierung
Kohlenstoff						
TOC	[g/l]	11.568	100	10.807	100	16
DOC	[g/l]	9.653	83	7.776	72	14
POC	[g/l]	1.915	17	3.031	28	2
Stickstoff						
tN	[g/l]	0.884	100	0.779	100	0.7
gN _{org}	[g/l]	0.484	55	0.355	45	-
pN	[g/l]	0.210	24	0.285	37	-
NH ₄ -N	[g/l]	0.191	21	0.139	18	-
Feststoffe						
TR	[g/l]	20.101	100	22.832	100	25
oTR	[g/l]	14.520	72	15.583	68	20
Asche	[g/l]	5.581	28	7.249	32	5
Chemischer Sauerstoffbedarf						
tCSB	[g/l]	35.669	100	32.537	100	41
gCSB	[g/l]	28.836	81	22.550	69	39
pCSB	[g/l]	6.833	19	9.986	31	2
Phosphor						
tPO ₄ -P	[g/l]	0.229	100	0.221	100	0.5
gPO ₄ -P	[g/l]	0.181	79	0.187	85	-
pPO ₄ -P	[g/l]	0.048	21	0.034	15	-
Schwefel						
SO ₄ -S	[g/l]	0.373	-	0.258	-	> 1
Nährstoffverhältnisse						
tCSB : TOC	[-]	3.1	-	3.0	-	-
C : N : P	[-]	50 : 4 : 1	-	49 : 3.5 : 1	-	-

Die organische Belastung beider Substrate liegt um 10 – 20 % unter den Kennzahlen für die Dimensionierung. Die ungelösten Anteile sind prozentual jedoch höher als angenommen. Dies ist hauptsächlich auf die im Betriebsjahr 2002 noch nicht installierte Proteinabtrennung aus dem Grassaft zurückzuführen. Die Stickstoffkonzentrationen liegen im Bereich der auf früheren Analysen basierenden Resultate, der Phosphorgehalt der Schlemphen liegt eher tiefer als die Dimensionierungswerte.

Das C:N:P Verhältnis beider Substrate liegt mit 50 : 4 : 1 im günstigen Bereich für einen anaeroben Abbau. Eine Substratlimitation durch Stickstoff oder Phosphor liegt nicht vor.

Während der Silageperiode wird der EGSB Reaktor mit durchschnittlich 28 m³ Grassaft beschickt, was einer hydraulischen Aufenthaltszeit von 20 Tagen entspricht (Tabelle 5). Während der Grasperiode wird bei durchschnittlichen 30 m³ Grassaft pro Tag eine hydraulische Aufenthaltszeit von 19 d erreicht. Die Raumbelastung des Reaktors liegt in beiden Perioden bei 0.54 – 0.58 kg TOC/m³*d resp. 1.75 kg CSB/m³*d (Tabelle 6). Damit wird der EGSB Reaktor im Vergleich mit den Dimensionierungswerten massiv unterbelastet. Die hydraulische Auslastung liegt bei 14%, die organische Auslastung leicht über 12% der dimensionierten Reaktorkapazität.

Tabelle 5: Durchschnittliche Tagesbeschickung des EGSB

		Silageperiode (100% Silage) Ø Tagesbeschickung	Grasperiode (81%Gras, 19%Silage) Ø Tagesbeschickung
Beschickung			
TOC	[kg/d]	307	330
tN	[kg/d]	23.5	23.6
TR	[kg/d]	598	695
tCSB	[kg/d]	1005	991
tPO ₄ -P	[kg/d]	6.5	6.7
SO ₄ -S	[kg/d]	10.6	8.2
Dimensionierungskennzahlen			
Zulaufvolumen	[m ³ /d]	204	
tCSB	[kg/d]	8320	
Verweilzeit	[d]	2.8	
	[h]	67	
Kennzahlen 2002			
Zulaufvolumen	[m ³ /d]	28	30
Verweilzeit	[d]	20	19
Hydr. Auslastung	[%]	14	
CSB Auslastung	[%]	12	

Der EGSB Biogasreaktor zeigt während beider Substratperioden einen konstant hohen Abbaugrad von 70 – 85 % des total zugeführten organischen Materials (Tabelle 6). Mit Grassaft aus reinem Silagegras liegt der totale Abbaugrad um ca. 10 %-Punkte höher. Dies ist zurück zu führen auf den höheren Anteil an gelösten Komponenten im Grassaft der Silageperiode. Der Abbau der gelösten organischen Komponenten liegt in beiden Substraten mit 94 - 95 % konstant sehr hoch. Der Abbaugrad partikulärer organischer Komponenten dagegen liegt bei geringen 17 – 38 %. Auch hier ist in Grassaft aus siliertem Gras infolge der sauren Hydrolyse ein höherer Abbaugrad (Δ pCSB = 25 %) anzutreffen als in Grassaft aus mehrheitlich frischem Grasschnitt (Δ pCSB = 17 %)

Die volumetrische Raumbelastung B_R liegt in beiden Substratperioden mit 1.74 – 1.76 kg CSB/m³/d in einem für Schlammbedtreaktoren tiefen Bereich (Tabelle 6), die organische Auslastung des Reaktors liegt bei nur gerade 12 %. Die Schlammbelastung erreicht entsprechend tiefe Werte von 0.19 – 0.2 kg CSB/kg TR_{Pellets}*d. Die Werte für die spezifische Gasausbeute liegen bei guten 0.47 Nm³/kg CSB resp. auf den Abbau bezogen bei 0.6 – 0.68 Nm³/kg CSB_{abgebaut}.

Tabelle 6: Durchschnittliche Leistungskennzahlen während Silage- und Grasperiode

		Silageperiode (100% Silage)	Grasperiode (81% Gras, 19% Silage)
Hydraulische Kennzahlen			
Reaktorvolumen	[m ³]	570	570
Zulaufvolumen	[m ³ /d]	28	30
Hydraulische Verweilzeit	[d]	20.4	19.0
Abbau			
Abbau TOC	[%]	85	77
Abbau DOC	[%]	95	95
Abbau POC	[%]	38	31
Abbau tCSB	[%]	80	70
Abbau gCSB	[%]	94	94
Abbau pCSB	[%]	25	17
Belastung & Abbauraten			
Raumbelastung TOC _{zu} /m ³ *d	[kg/m ³ *d]	0.54	0.58
Raumbelastung tCSB _{zu} /m ³ *d	[kg/m ³ *d]	1.76	1.74
spezifische Abbauleistung TOC _{abgebaut} /m ³ *d	[kg/m ³ *d]	0.46	0.45
spezifische Abbauleistung tCSB _{abgebaut} /m ³ *d	[kg/m ³ *d]	1.40	1.22
Biomassebelastung tCSB _{zu} /TR-Pellets*d	[kg/t*d]	197	187
Biomassebelastung tCSB _{abgebaut} /TR-Pellets*d	[kg/t*d]	158	131
Gasausbeuten			
spez. Gasausbeute Gas/TOC _{zu}	[Nm ³ /kg]	1.45	1.39
spez. Gasausbeute Gas/TOC _{abgebaut}	[Nm ³ /kg]	1.73	1.87
spez. Gasausbeute Gas/tCSB _{zu}	[Nm ³ /kg]	0.47	0.47
spez. Gasausbeute Gas/tCSB _{abgebaut}	[Nm ³ /kg]	0.60	0.68
Dimensionierungskennzahlen			
Raumbelastung tCSB _{zu} /m ³ *d	[kg/m ³ *d]	14.6	
CSB Auslastung 2002	[%]	12	

5.4 Massenbilanzen der Silageperiode

Während der Silageperiode von Februar – Mai 2002 wurden Gesamtmassenbilanzen für organische Stoffe (TOC; CSB), für Feststoffe sowie für Stickstoff und Phosphor erstellt. Für die Feststoffbilanz liegen verlässliche Werte erst ab Anfang März 2002 vor. Der EGSB Reaktor wurde während dieser Periode ausschliesslich mit Grassaft basierend auf Silagegras gefüttert.

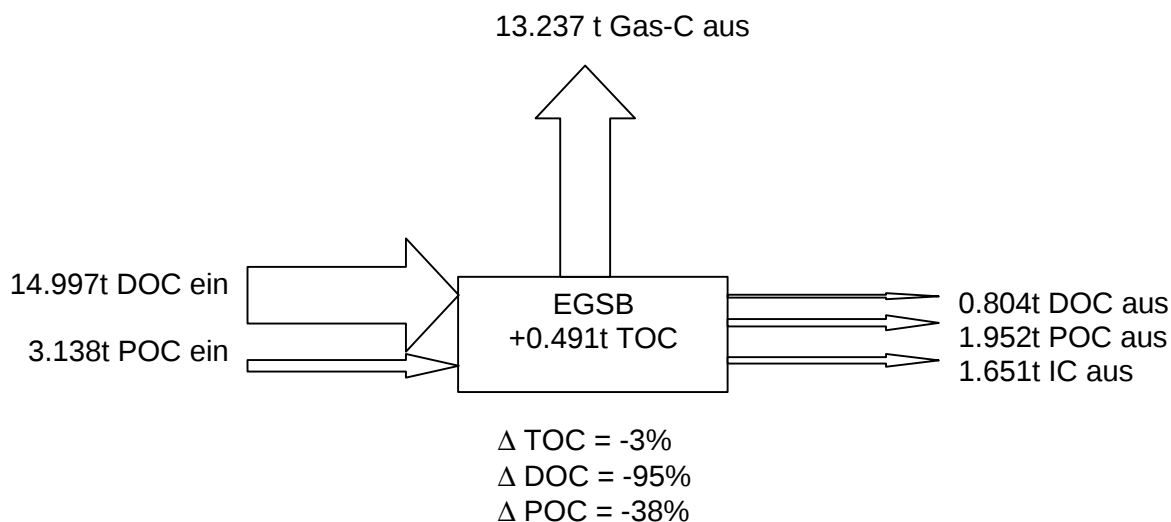


Abbildung 6: C-Massenbilanz über die Silageperiode

Aufgrund des tiefen pH-Wertes des Zulaufs (4.0 – 5.9) weist dieser keinen signifikanten Anteil an anorganischem Kohlenstoff (IC) auf. Gelöster Kohlenstoff DOC wird beinahe vollständig zu Biogas (CO_2 & CH_4) umgesetzt (Abbildung 6). Partikulärer Kohlenstoff POC wird teilweise hydrolysiert, teilweise als Biomasse (EGSB Pellets) oder als Feststofffraktion im Reaktor angereichert. Die Spezifizierung des Kohlenstoffs im anaeroben Reaktor als Biomasse-C resp. als Feststoff-C ist aufgrund der Messungen nicht möglich.

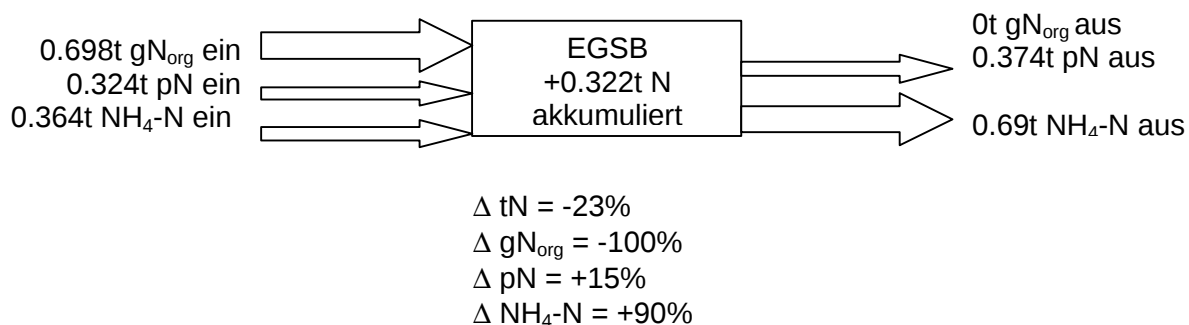


Abbildung 7: N-Massenbilanz über die Silageperiode

Auffallend ist in der Stickstoffbilanz der Silageperiode der vollständige mikrobiologische Umsatz des gelösten organischen Stickstoffs zu Ammonium (Abbildung 7). Als Konsequenz des Proteinabbaus und der damit einhergehenden Ammonifikation verdoppelt sich die $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration des Biogasreaktors von 0.2 g N/l im Zulauf auf gegen 0.4 g N/l im Auslauf. Die gesamte Stickstofffracht des zugeführten Grassafts aus Silage wird um 23 % abgebaut resp. im Reaktor angereichert.

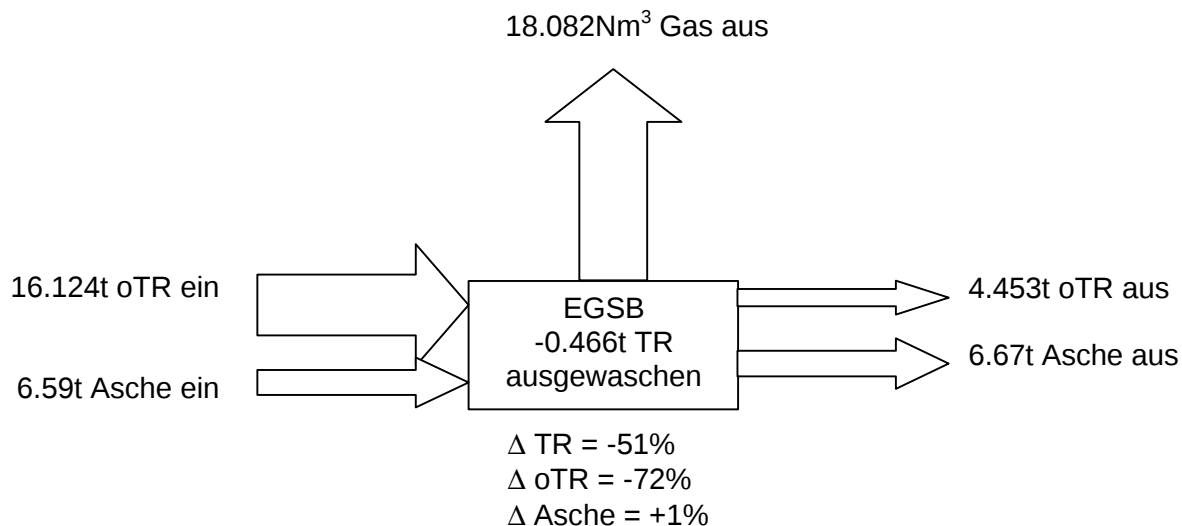


Abbildung 8: TR-Massenbilanz über die Silageperiode

Der dem Reaktor zugeführte organische Trockenrückstand wird während der Silageperiode um 72 % reduziert (Abbildung 8). Aus der EGSB-Schlamm Bilanz der Silageperiode lässt sich ein Auswaschen von 0.466 t TR aus dem Reaktor berechnen. Dieser Verlust an Trockenrückstand aus dem Reaktor ist hauptsächlich auf das Ausschwemmen von GUS und nicht auf einen Verlust von Pellets zurück zu führen.

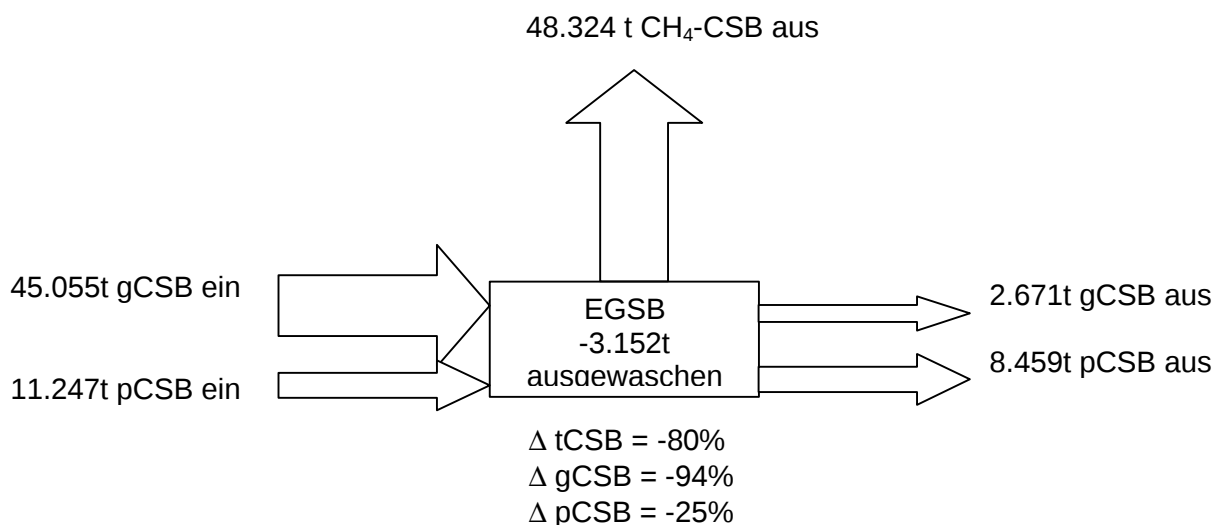


Abbildung 9: CSB-Massenbilanz über die Silageperiode

Die CSB Bilanz der Silageperiode zeigt analog zur Kohlenstoffbilanz einen weitgehenden Abbau des gelösten CSB von 94 % (Abbildung 9). Der geringe Abbau des partikulär gelösten CSB von nur gerade 25 % trägt zu einem Gesamtabbau des CSB von 80 % bei. Während der Silageperiode werden 3.15 t CSB hauptsächlich in Form von GUS und weniger als Pellets aus dem Reaktor ausgewaschen.

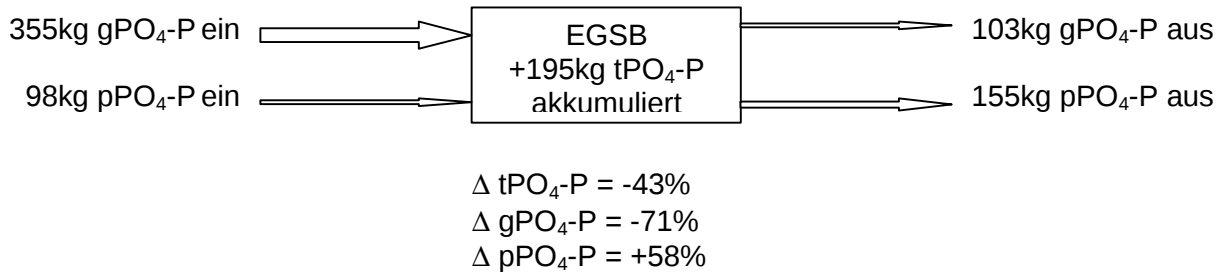


Abbildung 10: P-Massenbilanz über die Silageperiode

Während der Silageperiode findet im EGSB Reaktor eine starke Umwandlung des gelösten Phosphors in partikulär gebundenen P statt. Eine Anreicherung von gegen 200 kg partikulär gebundenem Phosphor (Abbildung 10), was mehr als 40 % des zugefütterten P entspricht, ist zu beobachten.

5.5 Massenbilanzen der Grasperiode

Während der Grasperiode von Mai – September 2002 wurden Gesamtmassenbilanzen für organische Stoffe (TOC; CSB), für Feststoffe sowie für Stickstoff und Phosphor erstellt. Der EGSB Reaktor wurde während dieser Periode in der Summe mit Grassaft gefüttert, welcher zu 81 % aus der Verarbeitung von Frischgras und zu 19 % aus der Verarbeitung von Silage bestand.

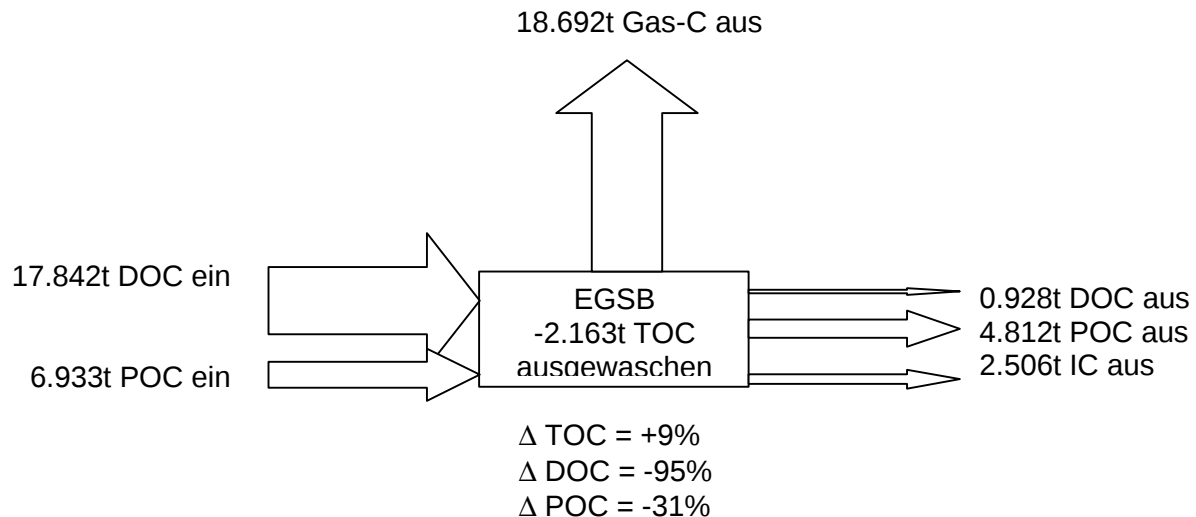


Abbildung 11: C-Massenbilanz über die Grasperiode

Aufgrund des tiefen pH-Wertes des Zulaufs (3.9 – 5.3) weist dieser keinen signifikanten Anteil an anorganischem Kohlenstoff (IC) auf. Gelöster Kohlenstoff DOC wird weitgehend zu Biogas (CO_2 & CH_4) umgesetzt (Abbildung 11). Partikulärer Kohlenstoff POC wird zu 31 % hydrolysiert.

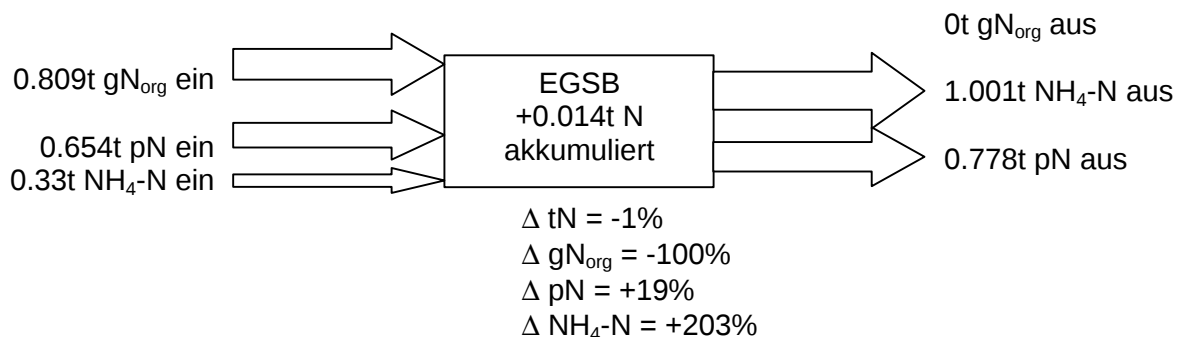


Abbildung 12: N-Massenbilanz über die Grasperiode

Analog zur Silageperiode wird auch in der Grasperiode der gesamte gelöste organische Stickstoff zu Ammonium umgewandelt (Abbildung 12) was zu einem Anstieg der $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration von 0.15 g N/l im Zulauf auf 0.55 g N/l im Reaktorauslauf führt.

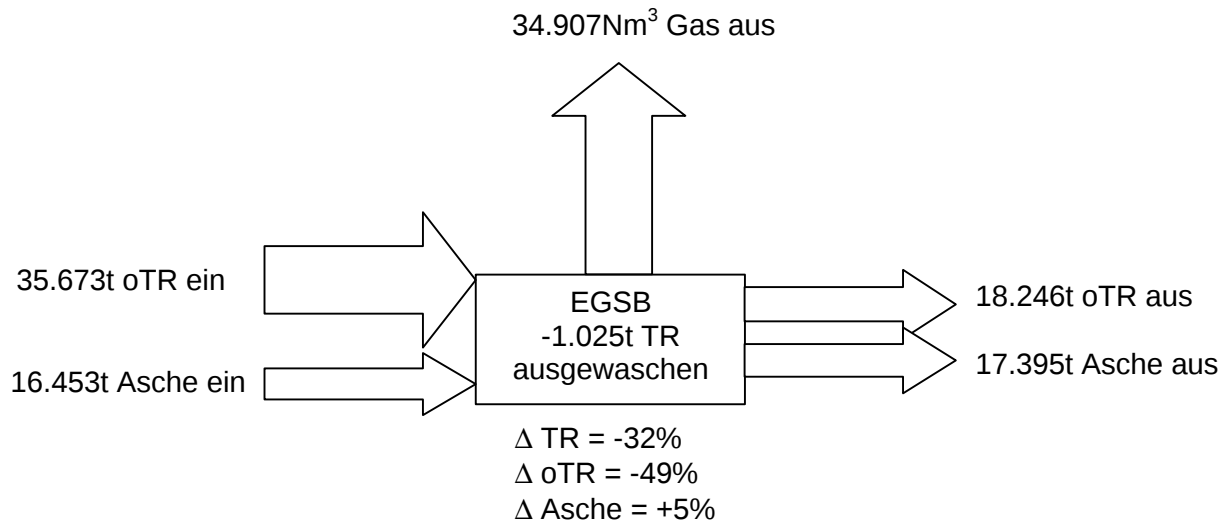


Abbildung 13: TR-Massenbilanz über die Grasperiode

Der dem Reaktor zugeführte organische Trockenrückstand wird während der Silageperiode lediglich um 49 % reduziert (Abbildung 13). Aus der EGSB-Schlamm Bilanz der Silageperiode lässt sich ein Auswaschen von 1.025t TR aus dem Reaktor berechnen. Dieser Verlust an Trockenrückstand aus dem Reaktor ist hauptsächlich auf das Ausschwemmen von GUS und nicht auf einen Verlust von Pellets zurück zu führen.

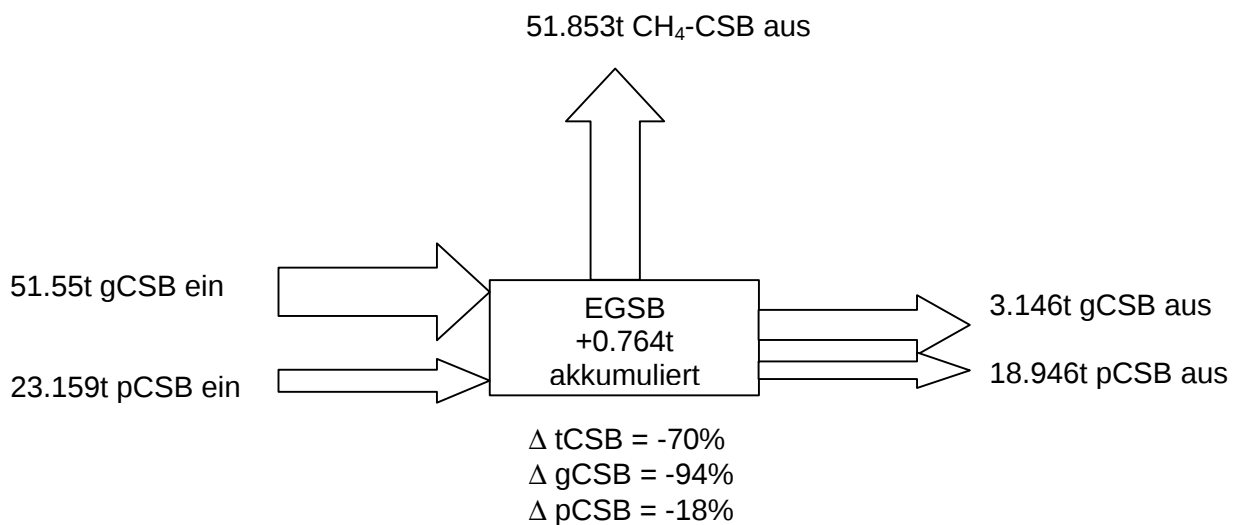


Abbildung 14: CSB-Massenbilanz über die Grasperiode

Die CSB Bilanz der Grasperiode zeigt analog zur Kohlenstoffbilanz einen weitgehenden Abbau des gelösten CSB von 94 % (Abbildung 14). Der geringe Abbau des partikulär gelösten CSB von nur gerade 18 % trägt zu einem Gesamtabbau des CSB von 70 % bei.

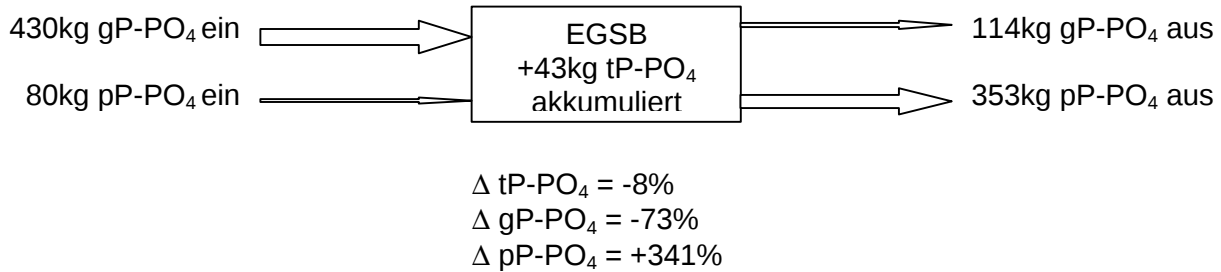


Abbildung 15: P-Massenbilanz über die Grasperiode

Während der Grasperiode findet im EGSB Reaktor eine Anreicherung von 43 kg partikulär gebundenem Phosphor statt (Abbildung 15) was 8 % des zugefütterten P entspricht. Es findet auch mit Grassaft aus der Verarbeitung von Frischgras eine starke Umwandlung des gelösten Phosphors in partikulär gebundenen P statt.

5.6 Schwefelbilanz

Tabelle 7: SO₄-S Frachten der Silage- und Grasperiode

		SO ₄ -S Zulauf	SO ₄ -S Ablauf	H ₂ S-S Rohgas	Δ	Δ
Silageperiode	[kg]	603	167	41	395	-66
Grasperiode	[kg]	614	138	58	418	-68

Die Schwefelbilanz ergibt während beider Fütterungsperioden einen Minderbefund an Schwefel von 66% der Zulaufmengen (Tabelle 7). Dieser Schwefel liegt im Reaktorauslauf in Form reduzierter Schwefelverbindungen (H₂S, SO₂, SO₃, nicht analysiert) vor oder akkumuliert im EGSB.

5.7 Zusammenfassung der Zulauf- und Ablaufdaten

Die durchschnittlichen Zulauf- und Ablaufwerte des EGSB Reaktors sind in Tabelle 8 dargestellt. Die beiden Substrate „Grasschlempe“ und „Silageschlempe“ waren bis auf wenige Parameter vergleichbar in der Zusammensetzung. Die Silageschlempe wies erwartungsgemäss leicht erhöhte Gehalte an gelösten Komponenten auf. Der Trockensubstanzanteil (nicht aber der CSB resp. TOC) war signifikant tiefer als in der Grasschlempe.

Tabelle 8: Durchschnittliche Zulauf- und Ablaufkonzentrationen des EGSB Reaktors

		Silageperiode		Grasperiode	
		Zulauf EGSB	Auslauf EGSB	Zulauf EGSB	Auslauf EGSB
Hydraulik, chemisch –physikalische Parameter					
Menge	[m3]	28.00		29.76	
Temperatur	[°C]	28.96	31.85	34.58	33.43
pH Wert	[[-]]	4.74	7.22	4.88	7.18
Leitfähigkeit	[mS/cm]	7.12	9.04	8.96	10.18
Organische Parameter					
TOC	[mg/l]	11570	1660	10810	2470
DOC	[mg/l]	9650	500	7780	390
POC	[mg/l]	1920	1230	3030	2080
tCSB	[mg/l]	35670	6790	32540	9540
gCSB	[mg/l]	28840	1650	22550	1310
pCSB	[mg/l]	6830	5140	9990	8230
TR	[mg/l]	20100	9700	33110	15590
oTR	[mg/l]	14520	3760	23020	7930
	[%l]	72	39	70	51
Anorganische Parameter					
tN	[mg/l]	880	660	780	760
NH ₄ -N	[mg/l]	190	590	140	600
tPO ₄ -P	[mg/l]	230	140	220	190
gPO ₄ -P	[mg/l]	180	5	190	5
pPO ₄ -P	[mg/l]	50	135	30	185
SO ₄ -S	[mg/l]	1120	320	770	180

5.8 Monatsbilanzen Feststoffe

Für die Beurteilung der Gesamtabbauleistung der anaeroben Biogasstufe wurden Monatsbilanzen der Feststoffe (Trockenrückstand) der gesamten Grasverarbeitung erstellt. Auf Feststoffbasis liegen 60 – 70 % des Rohmaterials Gras in Form der Faserprodukte vor (Abbildung 17). Bei der Faserproduktion entstehen Feststoffverluste von ca. 10 %. Die Biogasproduktion weist bezüglich der Umsetzung von Feststoffen einen Wirkungsgrad von 30 – 50 % auf (Abbildung 8, Abbildung 13). Insgesamt 5 – 15 % der Feststoffe des Rohmaterials gelangen in den Auslauf des EGSB Reaktors. Diese Fraktion von 4 – 10 t/mt (Abbildung 16) stellt grob den Anteil an rückgewinnbarem Protein dar.

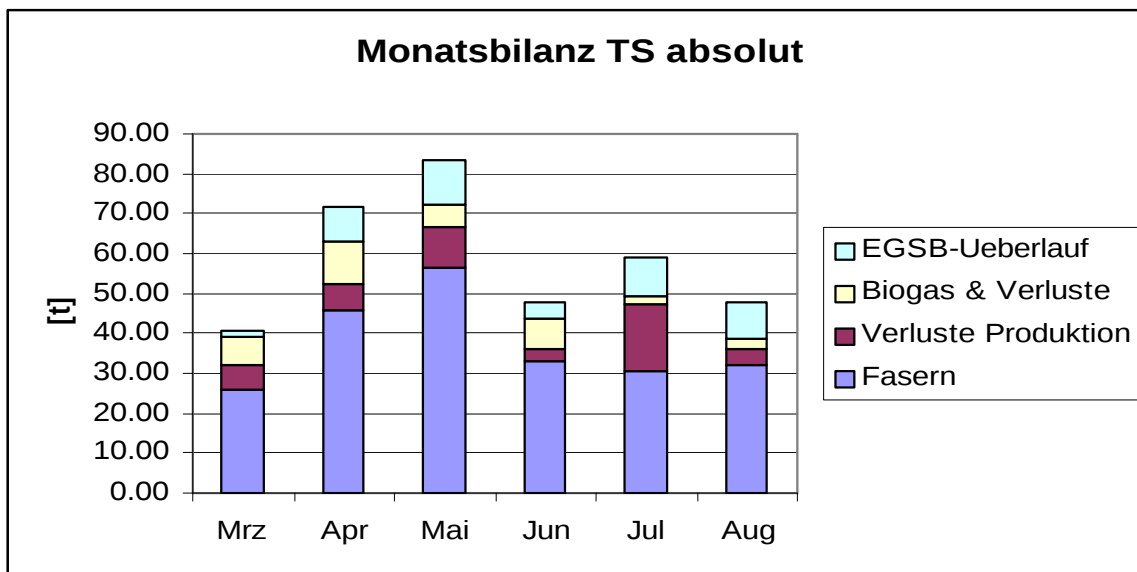


Abbildung 16: Absolute TR-Bilanz der Grasraffinerie 2002

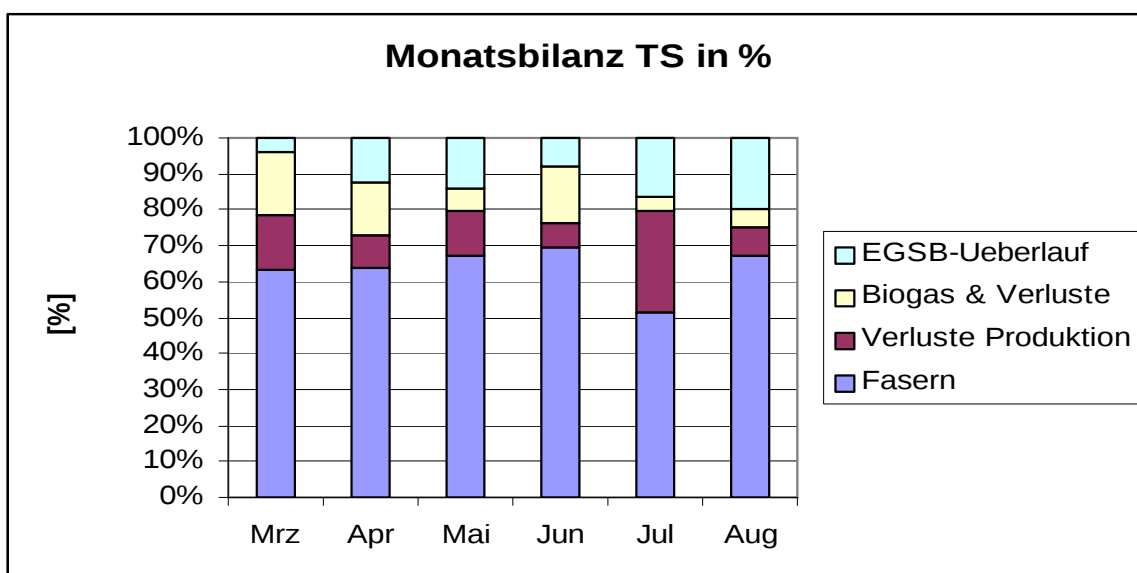


Abbildung 17: Prozentuale TR-Bilanz der Grasraffinerie 2002

5.9 Zeitlicher Verlauf chemisch-physikalischer Parameter

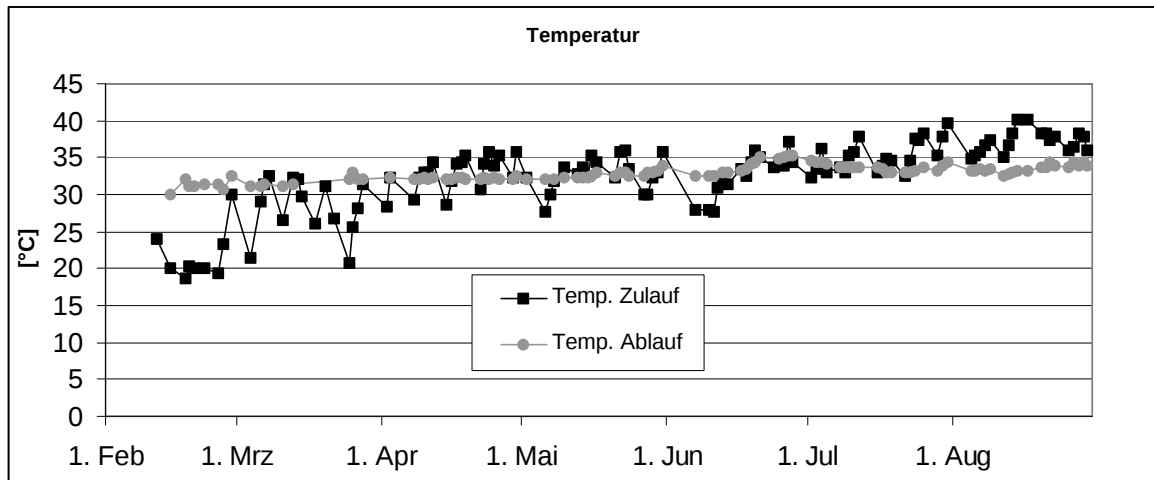


Abbildung 18: Temperatur von EGSB Zu- und Ablauf

Die Zulauftemperatur des Grassaftes liegt jahreszeitlich bedingt zwischen 20 °C – 40 °C. Sie wird durch Abkühlung oder Erwärmung im vorgeschalteten, nicht beheizten Puffertank beeinflusst. Die Reaktortemperatur von 30 °C – 35 °C ist ausgeglichen und wird durch Schwankungen der Zulauftemperatur nicht beeinflusst (Abbildung 18). Auch hier ist ein jahreszeitlich bedingter leichter Anstieg zu beobachten. Es besteht kein Temperaturunterschied zwischen Silage- und Grasperiode.

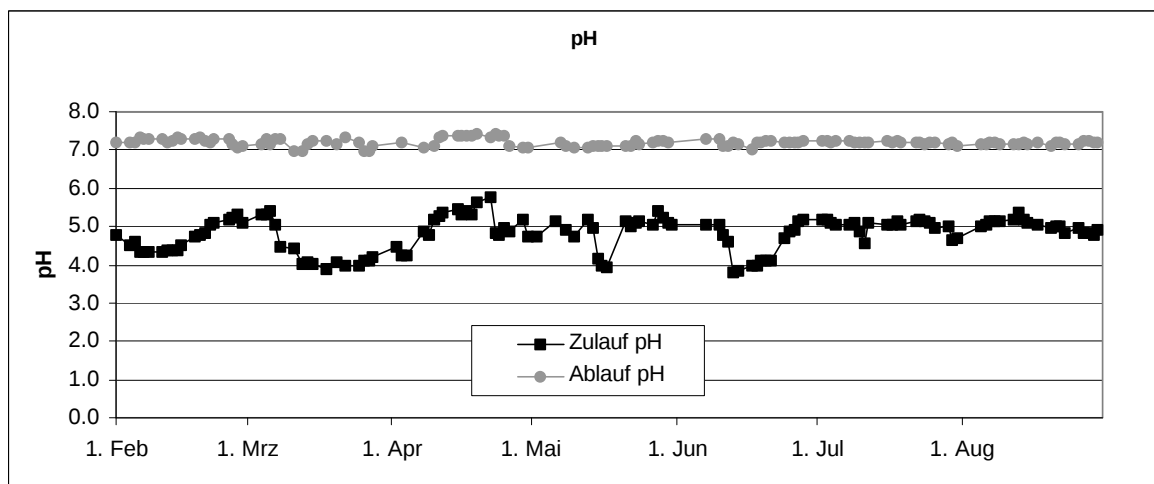


Abbildung 19: pH-Wert von EGSB Zulauf und Ablauf

Der pH-Wert des zugefütterten Substrates bewegt sich in beiden Substratperioden zwischen 3.9 – 5.9 (Abbildung 19). Er wird direkt beeinflusst von der Aufenthaltszeit und der acidogenen Aktivität im vorgeschalteten Pufferbehälter. Es ist kein genereller Unterschied der Vorversäuerung zwischen Grassaft aus Silage und aus Frischgras zu beobachten. Der Reaktor pH-Wert liegt stabil und selbstregulierend bei 7.1 – 7.3.

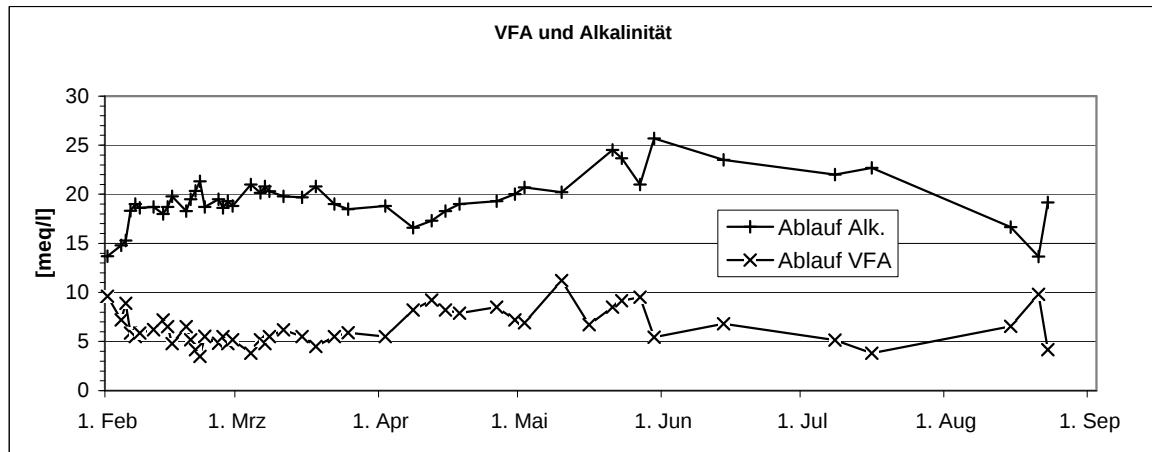


Abbildung 20: VFA und Alkalinität von EGSB Zu- und Ablauf

Die Alkalinität und das Gesamtäquivalent kurzkettiger Fettsäuren (VFA) wurden als mögliche Überwachungsparameter des anaeroben EGSB Reaktors in das Monitoring mit einbezogen. Beiden Parameter erweisen sich als stabil, es sind keine Abhängigkeiten von Substratart, Jahreszeit oder Beschickungsmenge festzustellen. Die Konzentration an kurzkettigen Fettsäuren liegt stabil zwischen 4 – 11 meq/l entsprechend 240 – 660 mg Acetatäquivalente/ml (Abbildung 20).

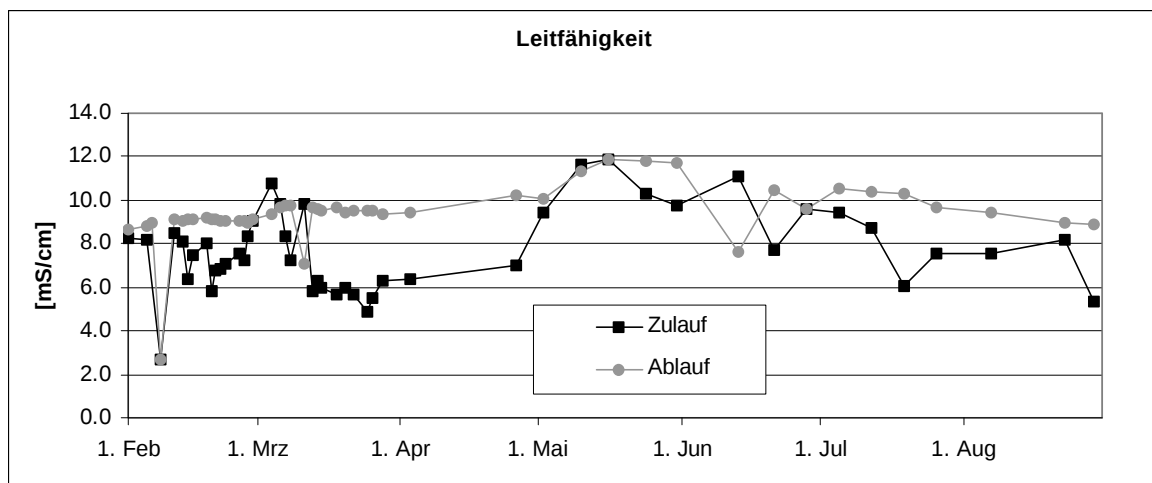


Abbildung 21: Leitfähigkeit von EGSB Zu- und Ablauf

Die Leitfähigkeitswerte der beiden Substratqualitäten unterscheiden sich nicht wesentlich und liegen im Bereich vom 5 – 12 mS/cm (Abbildung 21). Der EGSB Reaktor hat eine vergleichsmäßigende Funktion auf die Leitfähigkeit. Infolge u.a. der Freisetzung von Ammonium durch den anaeroben Abbau ist ein Anstieg der Ionenkonzentration und damit der Leitfähigkeit um 2 – 3 mS/cm zu verzeichnen.

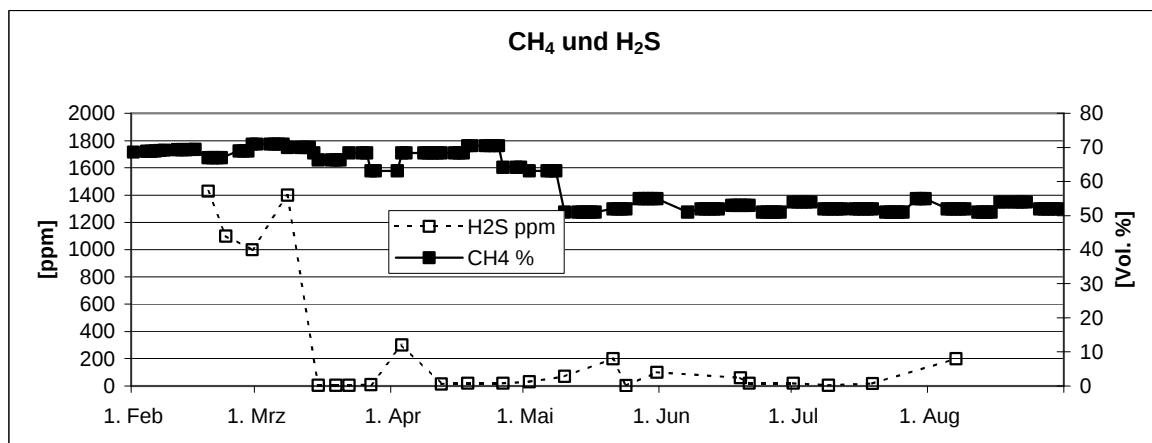


Abbildung 22: Konzentrationen von CH₄ und H₂S im Biogas

Der Methangehalt im Biogas ab EGSB Reaktor liegt während der Silageperiode konstant zwischen 64 – 71 %vol. entsprechend einem CO₂ Gehalt von 29 – 36 %vol (Abbildung 22). Ab Mitte Mai 2002 wird die leicht geruchsbelastete und CO₂ reiche Abluft des vorge-schalteten Puffertanks in die Biogasleitung eingespiesen. In der Folge ist ein Anstieg des CO₂ Gehaltes resp. ein Absinken der CH₄ Konzentration auf 51 – 55 %vol. zu verzeichnen.

In einer ersten Phase während der Silageperiode sind im Biogas erhöhte Konzentrationen von Schwefelwasserstoff H₂S von 1000 – 1500 ppm zu finden. Nach Inbetriebnahme des biologischen Entschweflers ab Mitte März 2002 sinken die H₂S Gehalte im Biogas auf Werte unter 80 ppm, punktuell treten Einzelkonzentrationen bis maximal 380 ppm auf.

5.10 Biomassebilanz des EGSB Reaktors

Während der gesamten, 8 monatigen Monitoringperiode ist eine konstant gute Biogasproduktion und ein stabiler Abbau durch die anaerobe Biomasse im EGSB Reaktor zu beobachten. Die organische Belastung des Reaktors liegt dabei deutlich unter der Dimensionierungsgrösse (Tabelle 6). Entsprechend liegt die hydraulische Aufenthaltszeit im Reaktor mit 20 d hoch und ermöglicht theoretisch die Etablierung einer rein suspendierten, nicht pelletförmigen Biomasse. Damit ist auch die Möglichkeit der Verschlämzung, d.h. der Sedimentation von anaerober Biomasse oder von partikulären, nicht abgebauten Substratbestandteilen gegeben.

Zur Beurteilung der Biomasseentwicklung im Reaktor wurden monatliche Bilanzierungen des TR und des oTR durchgeführt (Abbildung 23, Abbildung 24). Zusätzlich sind vertikale Feststoffprofile des EGSB Reaktors erstellt worden, welche über die Entwicklung des Schlammbeds und eine mögliche Verschlämzung Auskunft geben (Abbildung 25 - Abbildung 32). Als Monitoringparameter dient neben dem Pellet-TR der Gehalt an gesamten ungelösten Stoffen (GUS) nach mechanischer Abtrennung der Pellets.

Die Gesamtfrachten an anaeroben Pellets, GUS und gelösten Reststoffen im Reaktor verändern sich während der Monitoringperiode nur leicht (Abbildung 23). Der Gehalt an anaeroben Pellets liegt anfänglich bei ca. 6000 kg und zeigt leicht sinkende Tendenz. Auf das aktive Volumen von ca. 90 m³ (16 % des Reaktorvolumens) bezogen, entspricht dies einer mittleren Pelletkonzentration von 55 – 65 kg TR/m³. Der mittlere Durchmesser der EGSB Pellets liegt konstant bei ca. 1.2 mm. Die Sedimentation der Pellets ist zu jeder Zeit gewährleistet, im Reaktoroberteil und im Auslauf finden sich keine signifikanten Konzentrationen an Pellets. Der organische Anteil der Pellets zeigt über die Monitoringperiode eine leichte, aber stetige Abnahme von anfänglich 76% auf gegen 66% (Abbildung 24).

Ebenfalls konstant bleibt die Fracht von 5000 – 6000 kg GUS (ohne Pellets) im Reaktor (Abbildung 23), wobei sich diese Fracht gleichmässiger auf die gesamte Reaktorhöhe verteilt.

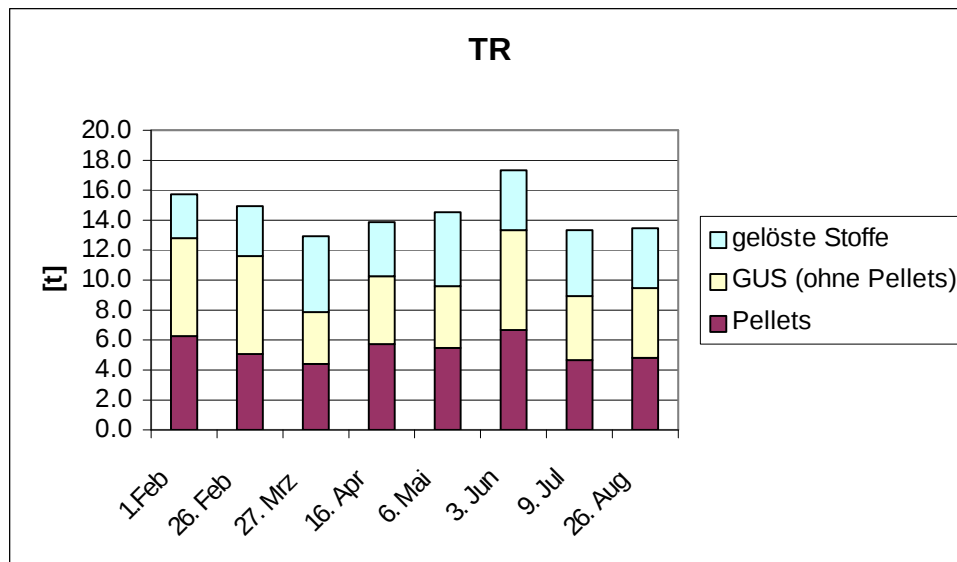


Abbildung 23: Entwicklung der Feststofffraktionen im EGSB Reaktor

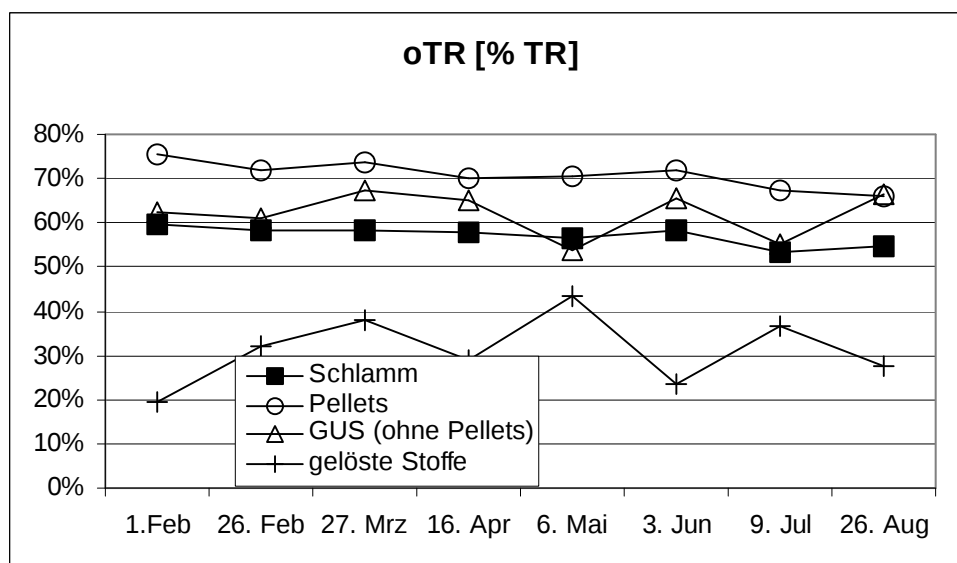


Abbildung 24: Entwicklung der organischen Fraktionen im EGSB Reaktor

5.11 Vertikale Schlammprofile des EGSB Reaktors

Mit den Zielen,

- das Wachstum oder den Zerfall der aktiven Pelletmenge zu verfolgen,
- eine Verschlämzung des EGSB Reaktors durch sedimentierende Feststoffe (GUS) zu erkennen und
- einen möglichen Rückhalt langsam abbaubarer Feststoffe (Proteinfraktion) infolge reaktorinterner Sedimentation aufzuzeigen

wurden in regelmässigen Abständen vertikale Profile der Fraktionen „Pellets“, „GUS ohne Pellets“ und „gelöste Stoffe“ über die gesamte Reaktorhöhe aufgenommen. Die Teilkonzentrationen der drei Fraktionen addieren sich dabei zur gesamten Schlammkonzentration (TR Schlamm).

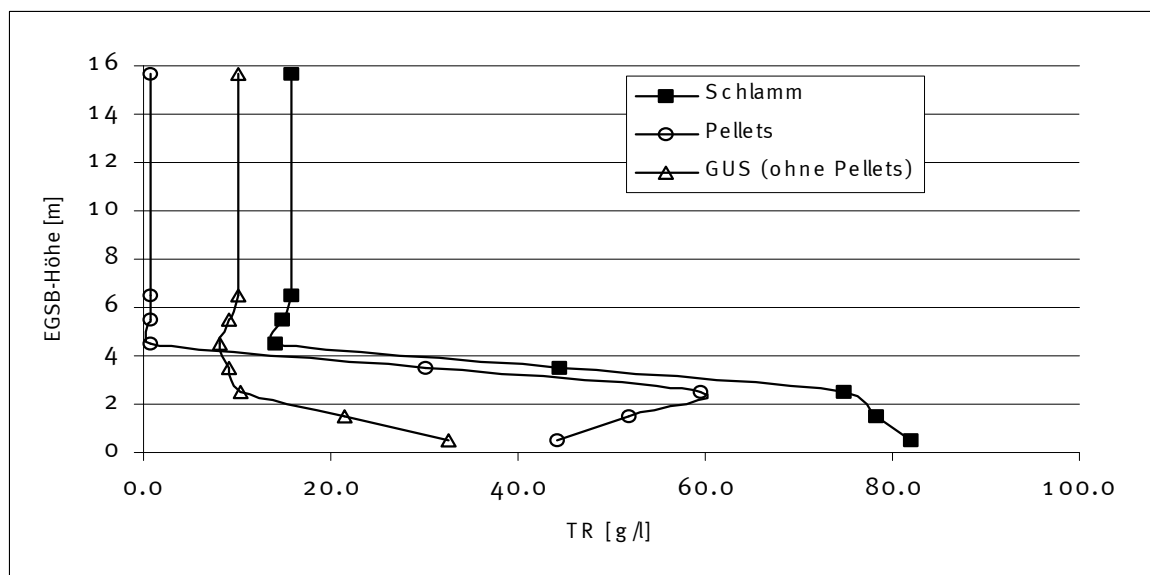


Abbildung 25: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 1.2.2002

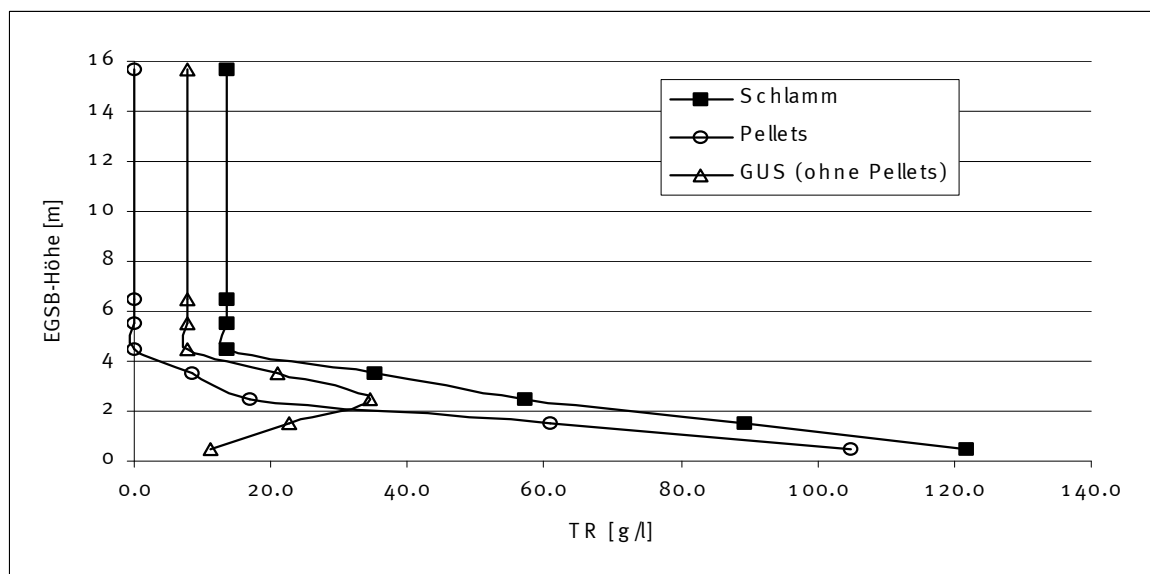


Abbildung 26: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 26.2.2002

Die monatlich aufgenommenen Schlammprofile (Abbildung 25 - Abbildung 32) zeigen eine konstant hohe Konzentration von 100 – 130 g/l TR von Pellets am Reaktorboden. Die Pelletkonzentration nimmt im unteren Viertel des EGSB Reaktors linear ab, ab einer hydraulischen Höhe von 4 m sind kaum mehr Pellets anzutreffen. Aufgrund der guten Sedimentationseigenschaften des Pellettschlammes sinkt die obere Grenze des Pellettspiegels im Laufe der Monitoringperiode auf gegen 2.5 m. Das aktive Volumen des EGSB Reaktors liegt damit bei ca. 90 m³.

Während der Monitoringperiode 2002 ist die aufsummierte Menge des Pellettschlammes im EGSB Reaktor von ca. 6000 kg TR auf gegen 5000 kg TR zurückgegangen. Dieser Rückgang ist auf den sinkenden organischen Anteil des Pellettschlammes zurückzuführen, welcher sich von anfänglich 76% oTR auf 66% oTR verringerte. Die durchschnittliche Pelletgröße blieb unverändert bei 1.2 mm. Es wurde nie ein Aufschwimmen oder Abtreiben von Pellets beobachtet.

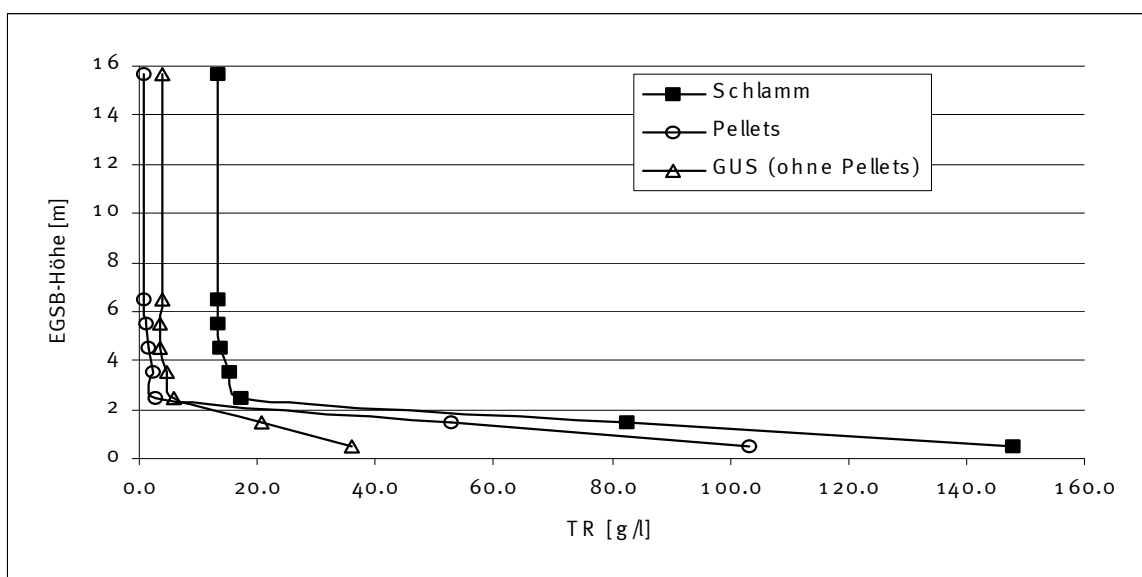


Abbildung 27: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 27.3.2002

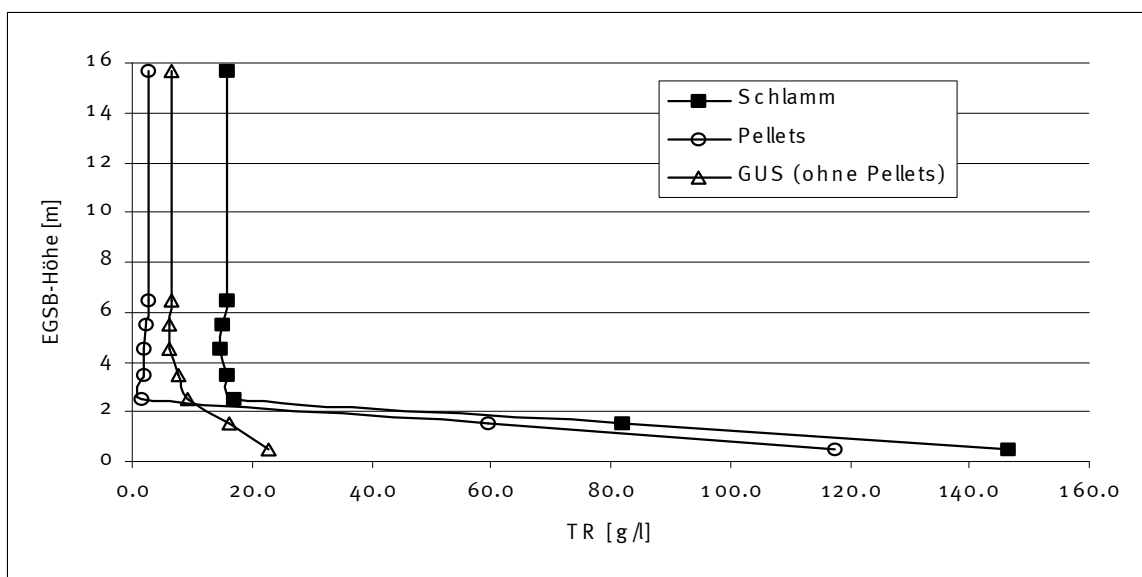


Abbildung 28: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 16.4.2002

Aufgrund der relativ hohen Konzentration an ungelösten Stoffen im Substrat Grassaft (2-3 g/l POC resp. 7.9 g/l pCSB, Tabelle 4) besteht die Möglichkeit einer reaktorinternen Sedimentation und Verschlämzung. Die Schlammprofile der gesamten ungelösten Stoffe GUS zeigen, dass dies nicht der Fall ist. Es stellt sich über die gesamte Reaktorhöhe eine einigermaßen konstante GUS Konzentration von 5-10 g/l ein. Es findet keine Verschlämzung statt. Der organische Anteil der GUS ohne Pellets liegt stabil bei 62 – 66 % oTR.

Der hohe Anteil an partikulären Stoffen im zulaufenden Substrat ist auf die noch nicht installierte Proteinabtrennung bei der Grasraffination zurück zu führen. Die ungelöste Proteinfraction im Grassaft wird anaerob im bestehenden EGSB Reaktor nur unvollständig umgesetzt und durchläuft den Reaktor. Eine Sedimentation der Proteinfraction mit entsprechend längerer Aufenthalts- und Abbauzeit findet nicht statt.

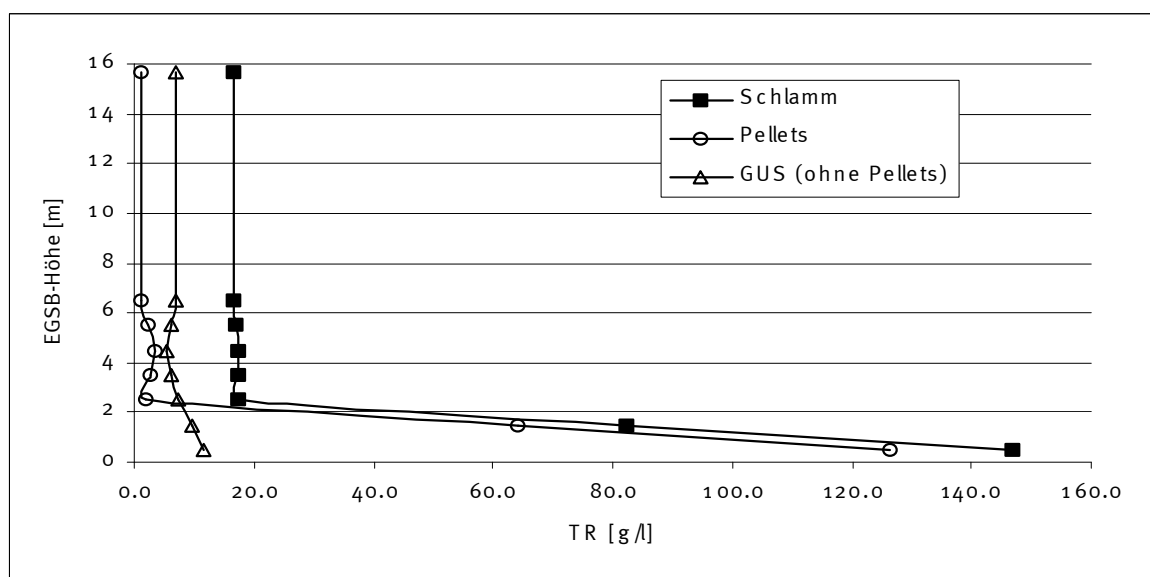


Abbildung 29: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 6.5.2002

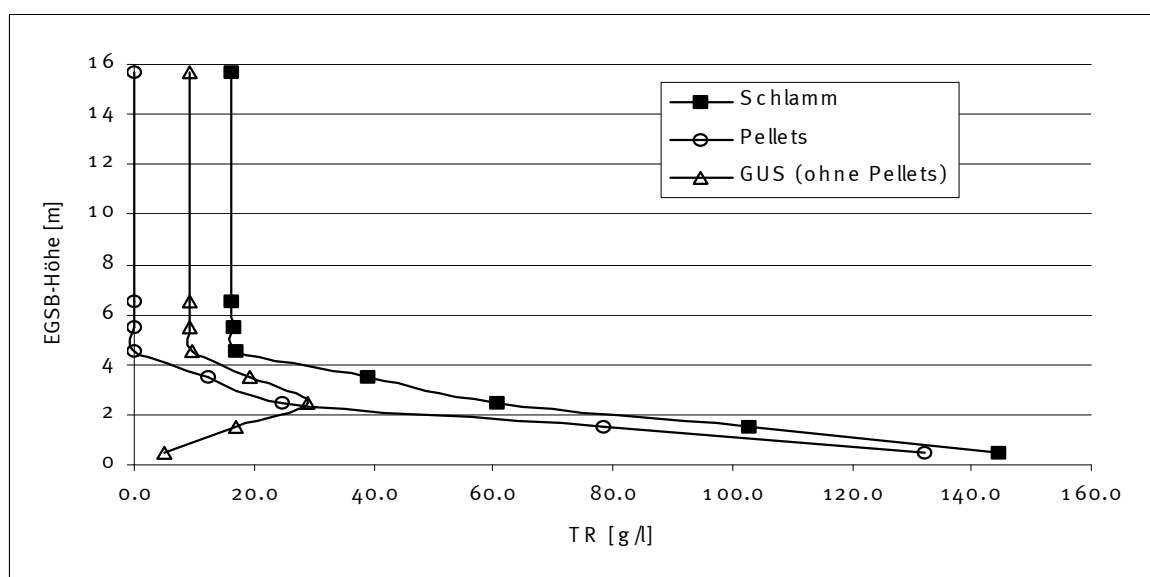


Abbildung 30: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 3.6.2002

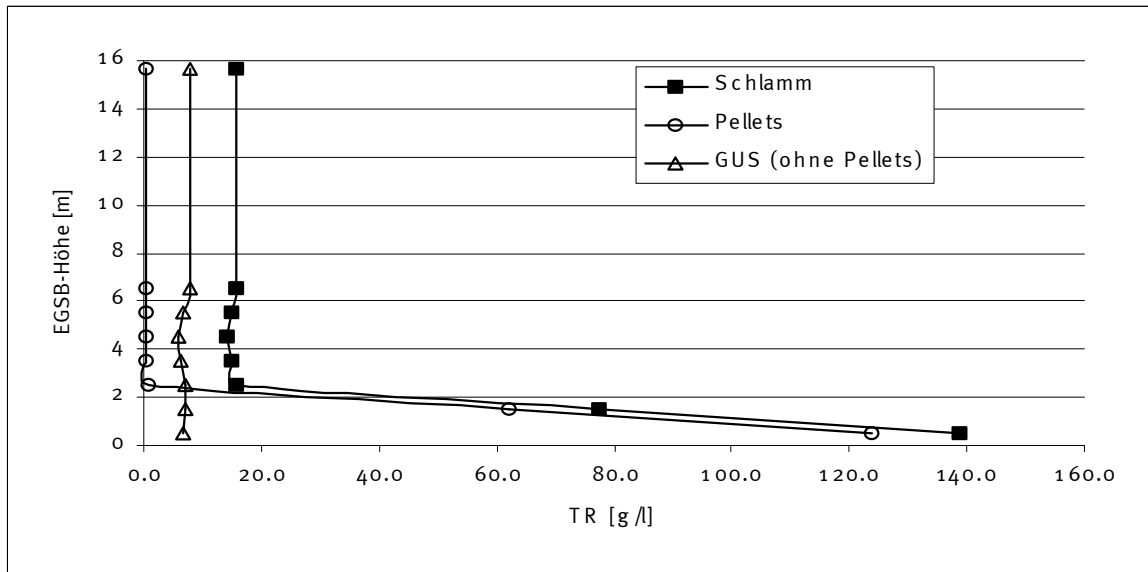


Abbildung 31: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 9.7.2002

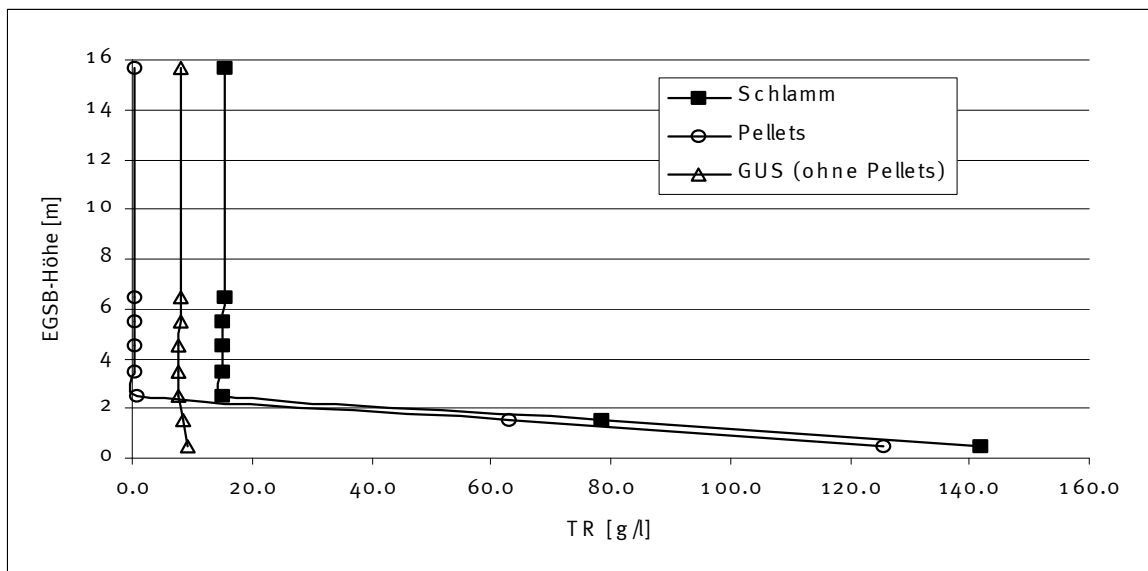


Abbildung 32: Schlammprofil EGSB-Reaktor am 26.8.02

5.12 Zeitliche Entwicklung der Leistungskennzahlen

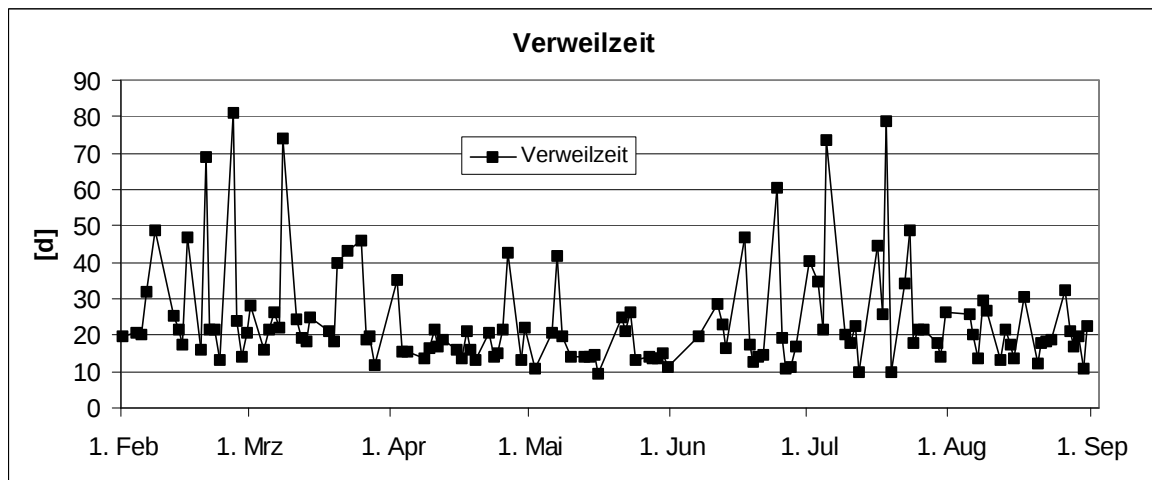


Abbildung 33: Hydraulische Verweilzeit (Tagesbilanzen)

Die hydraulische Verweilzeit bezogen auf das gesamte Reaktorvolumen liegt bei 20 Tagen, kurzzeitig werden bei Belastungsspitzen Werte von 10 Tagen erreicht (Abbildung 33), jedoch nie über signifikante Zeiträume. Bezogen auf das biologisch aktive Volumen von ca. 16 % des Reaktors ergibt sich eine hydraulische Verweilzeit von ca. 3 Tagen.

Aufgrund der Tagesbilanzen der gelösten organischen Fraktion ist ein konstant hoher Abbau von 95 % sowohl des DOC (Abbildung 34) als auch des gCSB (Abbildung 35) ersichtlich. Es bestehen keine Unterschiede beim Abbau gelöster Komponenten zwischen Silage- und Grasperiode (Abbildung 37). Hingegen ist ein Rückgang des Abbaus der ungelösten Fraktion von 75 – 90 % während der Silageperiode auf 50 – 70 % während der Grasperiode ersichtlich (Abbildung 34, Abbildung 35). Dies äussert sich in einem leichten Rückgang des Abbaus der totalen organischen Summenparameter (Abbildung 36).

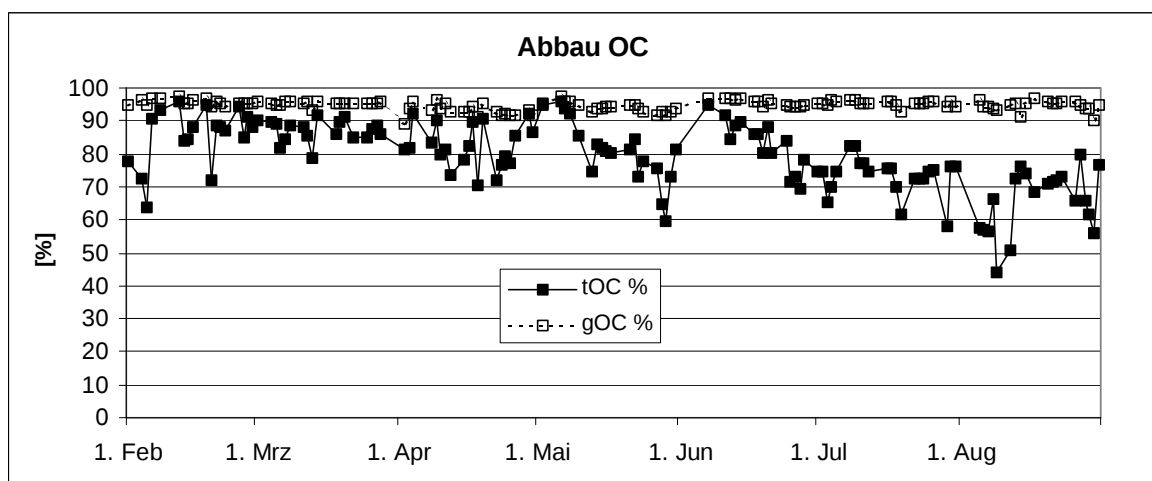


Abbildung 34: Entwicklung Abbau organischer Kohlenstoff OC (Tagesbilanzen)

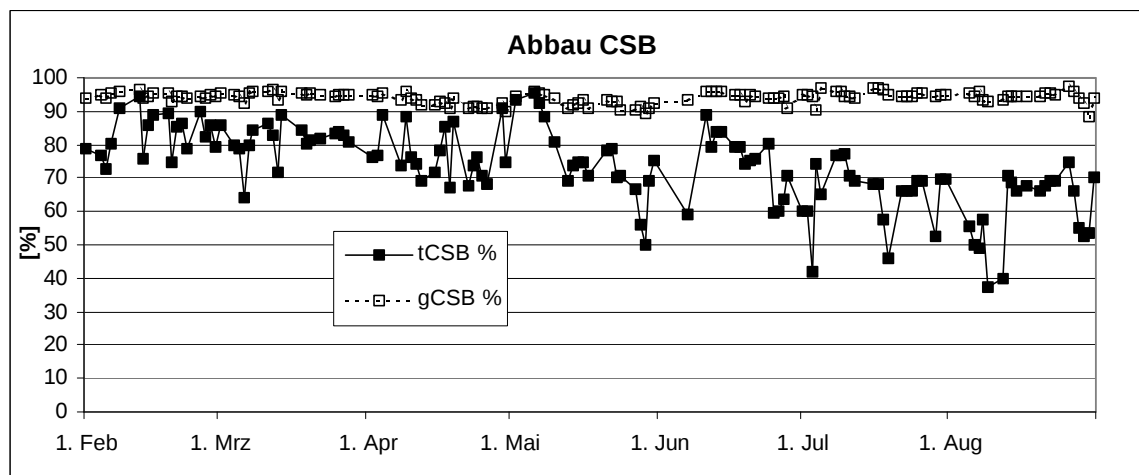


Abbildung 35: Entwicklung Abbau CSB (Tagesbilanzen)

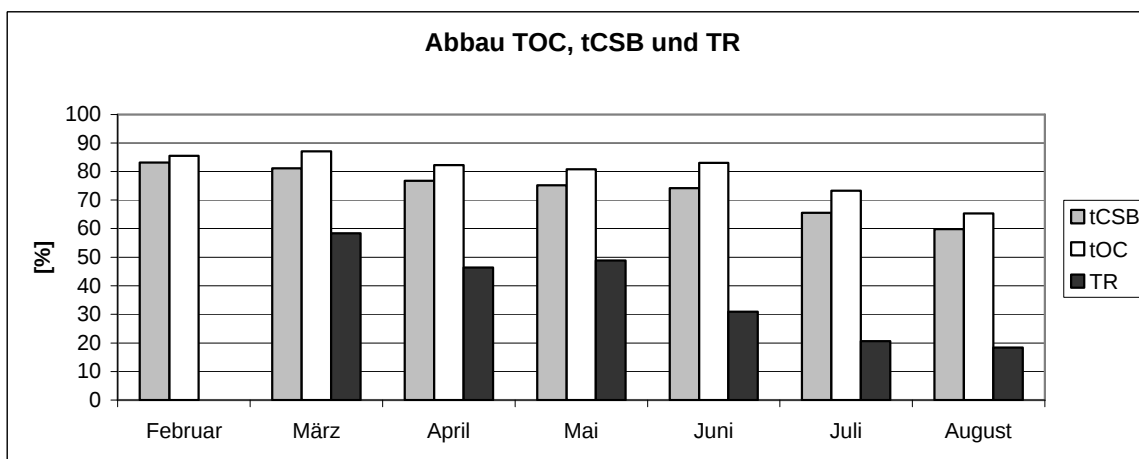


Abbildung 36: Entwicklung Abbau totaler Komponenten (Monatsbilanzen)

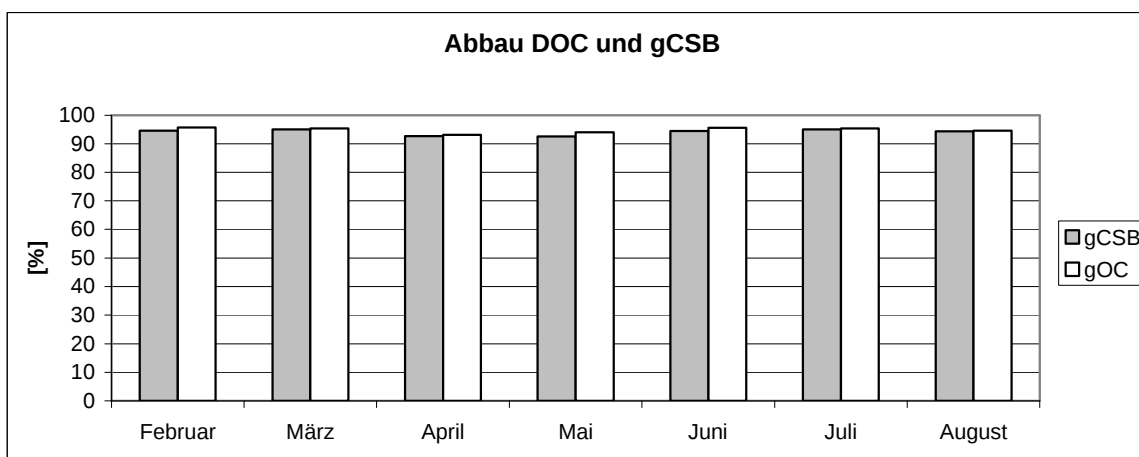


Abbildung 37: Entwicklung Abbau gelöster Komponenten (Monatsbilanzen)

Der leicht verminderte Abbau ungelöster organischer Komponenten in der Grasperiode trägt nur zu einem kleinen Teil zur gesamten Gasproduktion bei. Entsprechend bleibt die spezifischen Biogasausbeute während der beiden Perioden unverändert bei ca. $1.4 \text{ Nm}^3/\text{kg TOC}_{\text{zu}}$ (Abbildung 38) resp. $0.45 \text{ Nm}^3/\text{kg CSB}_{\text{zu}}$ (Abbildung 39). Die auf den Abbau bezogenen spezifischen Werte liegen mit $1.8 \text{ Nm}^3/\text{kg TOC}_{\text{abgebaut}}$ resp. $0.65 \text{ Nm}^3/\text{kg CSB}_{\text{abgebaut}}$ sehr nahe bei den stöchiometrischen Maximalwerten ($1.9 \text{ Nm}^3/\text{kg TOC}_{\text{abgebaut}}$ resp. $0.7 \text{ Nm}^3/\text{kg CSB}_{\text{abgebaut}}$).

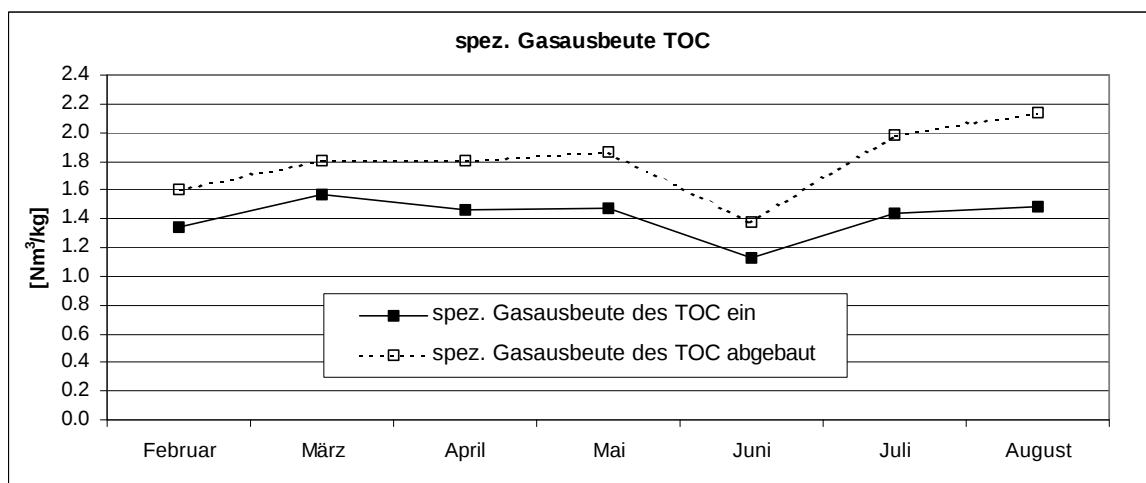


Abbildung 38: Spezifische Gasausbeute EGSB, bezogen auf TOC Zulauf / TOC Abbau

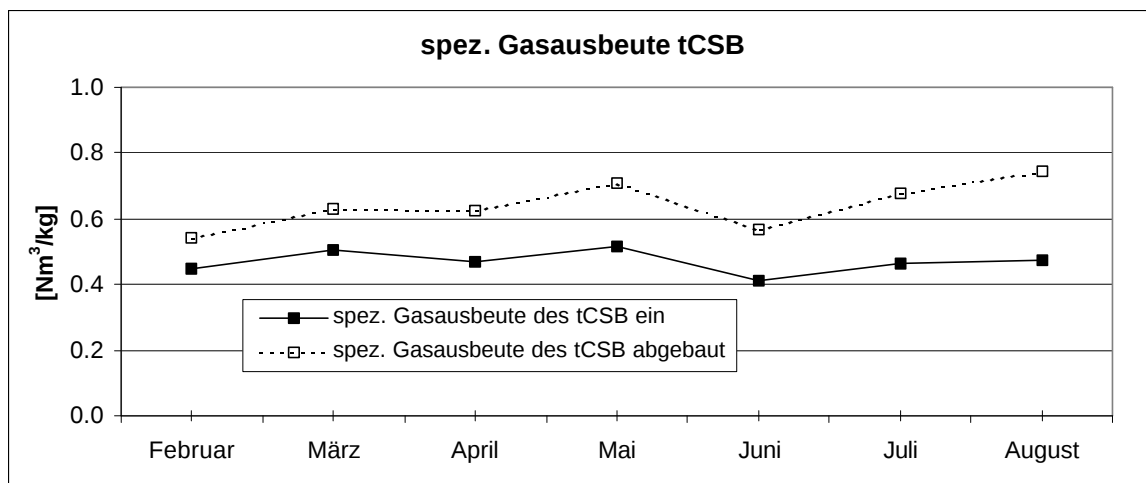


Abbildung 39: spezifische Gasausbeute EGSB, bezogen auf tCSB Zulauf / tCSB Abbau

Bei der monatlichen Bilanzierung der Kennwerte für die Raum- resp. Pelletsbelastungen treten Schwankungen zu Tage, welche auf hydraulische Schwachlastspitzen (Februar, März, Juni, Juli) zurückzuführen sind und die Monatsmittelwerte nach unten drücken. Die gemittelten Raumbelastungen ohne Berücksichtigung von Schwachlasttagen liegen bei $1.8 - 2.4 \text{ kg CSB}/\text{m}^3 \text{ d}$ resp. $0.6 - 0.8 \text{ kg TOC}/\text{m}^3 \text{ d}$ (Abbildung 40). Die entsprechenden korrigierten Schlammbelastungen bezogen auf die aktive Pelletfracht von 5000 kg liegen bei $60 - 85 \text{ kg TOC}_{\text{zu}}/\text{t Pellets d}$ resp. $180 - 230 \text{ kg CSB}_{\text{zu}}/\text{t Pellets d}$ (Abbildung 42, Abbildung 43). Für die beiden Substratperioden ergeben sich damit kaum signifikante Unterschiede bei der spezifische Abbauleistung (korrigiert: $0.4 - 0.6 \text{ kg TOC}/\text{m}^3 \text{ d}$) (Abbildung 41).

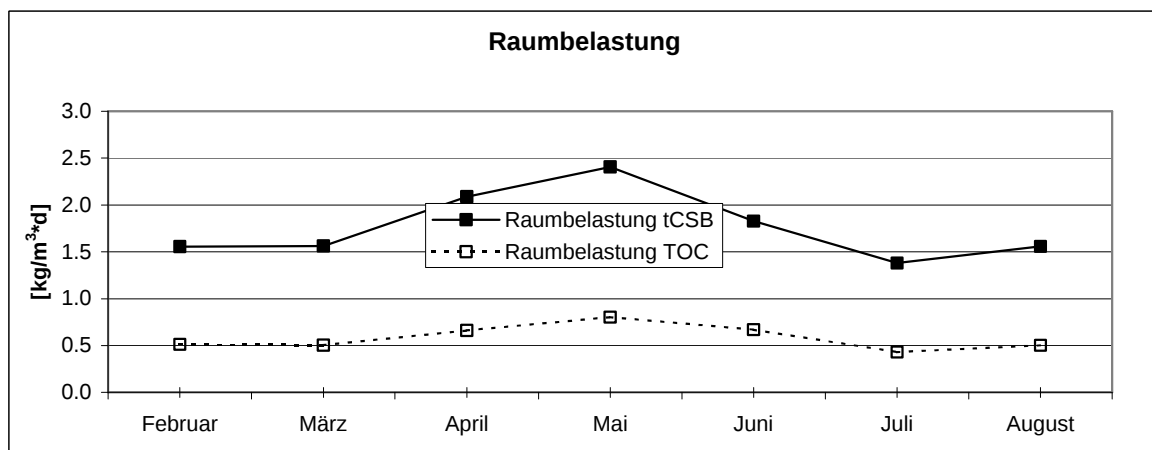


Abbildung 40: Raumbelastung EGSB, bezogen auf TOC_{zu} und tCSB_{zu}

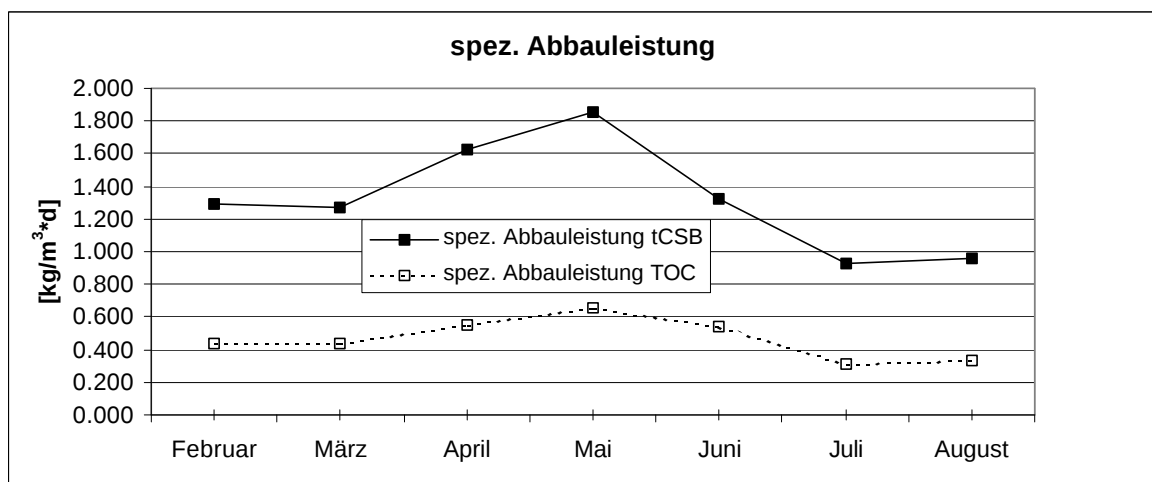


Abbildung 41: spezifische Abbauleistung $\text{TOC}_{\text{abgebaut}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ und $\text{tCSB}_{\text{abgebaut}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$

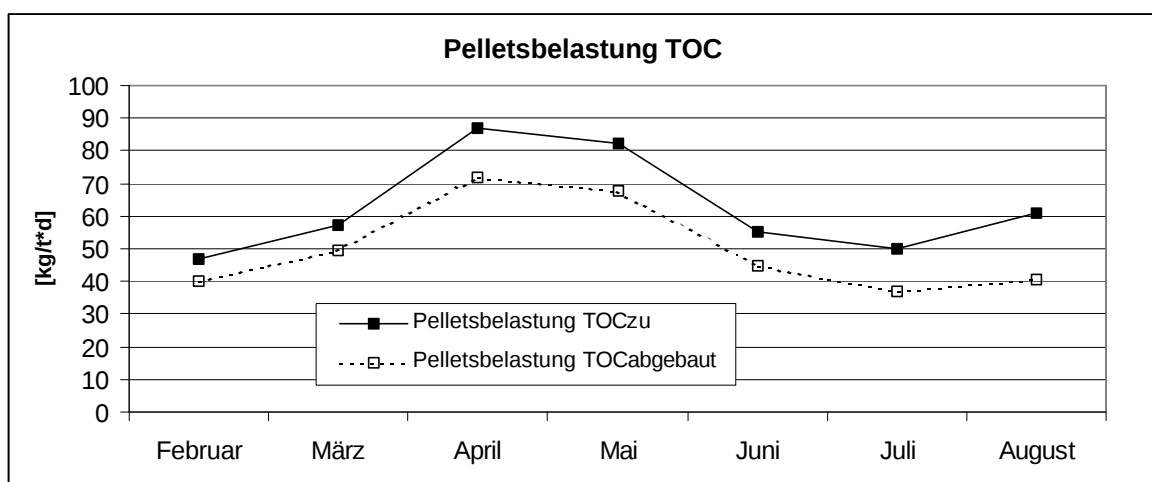


Abbildung 42: Pelletsbelastung (Schlammbelastung) bezogen auf TOC_{zu} und $\text{TOC}_{\text{abgebaut}}$

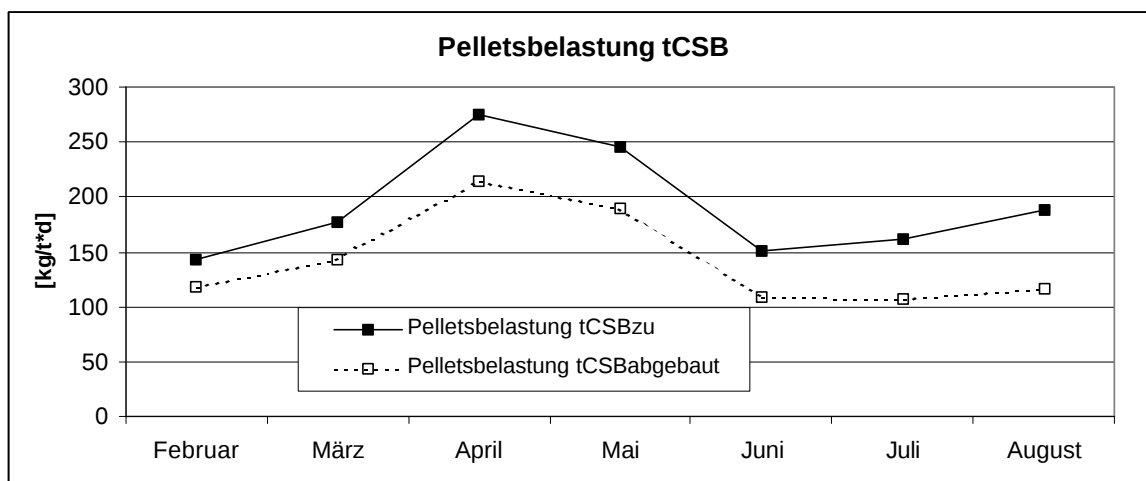


Abbildung 43: Pelletsbelastung (Schlammbelastung) bezogen auf tCSB_{zu} und tCSB_{abgebaut}

6. Schlussfolgerungen

6.1 Anaerober Abbau

Die anaerobe Abbaubarkeit von Rückständen aus der Grasraffination konnte als gut bezeichnet werden und lag bei 80% der totalen organischen Stoffe resp. bei 95% der gelösten organischen Stoffe.

Rückstände aus der Verarbeitung von Silage waren tendenziell weitgehender und schneller umzusetzen als Rückstände aus der Verarbeitung von Rohgras. Dies kann auf den mikrobiologischen Aufschluss komplexer Grasinhaltsstoffe während der milchsauren Silage zurück geführt werden.

Das mesophile Biogaspotential verschiedener Rückstände aus der Grasraffination lag bei 15 - 25 Nm³ Biogas / m³ Rohsubstrat resp. bei 1.4 Nm³ Biogas / kg organischem Kohlenstoff oder 0.5 Nm³ Biogas / kg CSB. Diese Werte liegen im Bereich der Literaturwerte von Substraten ähnlicher Herkunft und Zusammensetzung.

Die Rückstände wiesen einen ausreichend hohen Gehalt an Nährstoffen und Spurenstoffen auf um eine Limitation beim anaeroben Abbau auszuschliessen.

In unverdünnter Form traten bei der anaeroben Behandlung der Rückstände Substrathemmungen auf. Aus diesem Grund drängt sich eine Verfahrensführung mit Verdünnung oder Rezirkulation auf.

Eine thermisch-alkalische Hydrolyse der ungelösten Stoffe ist möglich, führt aber nicht zu einer erhöhten anaeroben Abbaubarkeit.

6.2 EGSB Reaktor

Ein stabiler Betrieb eines modifizierten UASB Reaktors (EGSB) war ohne weitere Massnahmen möglich. Allerdings liegen erst Langzeitdaten aus einer Niederlastperiode vor. Es ist vorzusehen, während einer zukünftigen Hochlastperiode ein weiteres, halbjähriges Monitoring der Leistungskennzahlen durchzuführen.

Bei tiefen Raumbelastungen von 1.8 kg CSB / m³ * d fand im EGSB Reaktor ein stabiler und nahezu vollständiger Abbau (>95%) gelöster organischer Substanz statt. Eine Akkumulation von gelösten Zwischenprodukten wurde nicht beobachtet.

Aufgrund von Laborversuchen ist für den EGSB Reaktor auch bei erhöhten Raumbelastungen von bis zu 12 kg CSB / m³ * d ein stabiler und weitgehender Abbau (80 – 90%) der gelösten organischen Stoffe zu erwarten.

Selbst bei tiefen Raumbelastungen fand nur ein teilweiser Abbau (30 – 40%) von ungelöstem Material statt. Hauptsächlich die partikuläre Proteinfraction entzog sich dem schnellen anaeroben Umsatz und stand damit für die Biogasproduktion nur eingeschränkt zur Verfügung.

Während ungelöste Stickstoffkomponenten (Proteine) nur teilweise umgesetzt wurden, fand eine vollständige Ammonifikation des gelösten organisch gebundenen Stickstoffs

statt. Anaerob behandelte Rückstände aus der Grasraffination wiesen entsprechend hohe Konzentrationen an Ammonium Stickstoff auf.

Der Betrieb des EGSB Reaktors war pH – stabil, eine Steuerung des pH-Wertes war nicht erforderlich.

Bei Inbetriebnahme der Proteinabtrennung wird eine starke Entlastung des EGSB Substrates von ungelösten, langsam abbaubaren Stoffen erreicht. Es ist vorzusehen, nach Inbetriebnahme der Proteinabtrennung ein weiteres halbjähriges Monitoring der Leistungskennzahlen durchzuführen.

6.3 EGSB Pellets

Eine Akkumulation von ungelösten Stoffen im EGSB fand nicht statt. Die Unterschiede der Sedimentationsgeschwindigkeiten der anaeroben Pellets und der ungelösten Feststofffraktion waren ausreichend, um bei vollständigem Pelletrückhalt eine interne Sedimentation und Verschlammung zu verhindern.

Während des ersten Betriebsjahres war keine Zunahme des Pelletvolumens zu beobachten.

Die vorhandene Menge an Pellets nutzt das Flüssigvolumen des Reaktors nur unzureichend aus. Die Pelletmenge und damit das aktive Reaktorvolumen kann verdreifacht werden.

7. Perspektiven

Die in der Grasaaffinerie Schaffhausen installierten Komponenten zur Faserproduktion und zur Energiegewinnung haben sich bewährt. 2002 lag die Auslastung der Gesamtanlage mit ca. 600 t TR/a an verarbeitetem Rohmaterial bei ca. 15 % der geplanten Menge. Für das Jahr 2003 ist vorgesehen, die Akquisition von Rohmaterial der Grasaaffinerie Schaffhausen zu intensivieren und damit die verarbeitete Rohstoffmenge massiv zu steigern. Bei einem angestrebten Durchsatz von 3000 t TR/a (250 t TR/Monat oder 12 t TR/d) wird sich das gesamte Produktvolumen in etwa verfünffachen.

Es ist eine Tendenz zu einem höheren Anteil an verarbeiteter Silage gegenüber Rohgras zu verzeichnen. Dies führt zu einer besseren Abbaubarkeit und einer leicht höheren Gasausbeute der anaeroben Substrate. Eine Ausweitung des Rohmaterialspektrums auf neue Stoffarten ist nicht wahrscheinlich. Die spezifischen Frachten der Schlemphen, welche für die Biogasproduktion zur Verfügung stehen (m^3 Abwasser pro t Rohmaterial TR) resp. die spezifischen Frachten an organischem Material (kg CSB im Abwasser pro t Rohmaterial TR) sowie die Zusammensetzung der Schlemphen werden sich kaum ändern.

Da das Schwergewicht 2003 auf Auslastung der bestehenden Komponenten liegen wird, geht die geplante Proteinabtrennung voraussichtlich 2003 nicht in Betrieb. Insgesamt ist daher mit einer 5 fach höheren Abwassermenge von $150 \text{ m}^3/\text{d}$ bei gleich bleibender Qualität zu rechnen. Die prognostizierten Belastungskennzahlen des EGSB Reaktors für 2003 sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Prognostizierte Kennzahlen des EGSB für 2003

		2002	2003
Beschickung			
TOC	[kg/d]	320	1600
tN	[kg/d]	24	120
TR	[kg/d]	650	3250
tCSB	[kg/d]	1000	5000
Dimensionierungskennzahlen			
Zulaufvolumen	[m ³ /d]	204	
tCSB	[kg/d]	8320	
Verweilzeit	[d]	2.8	
	[h]	67	
Raumbelastung	[kg CSB/m ³ *d]	14.6	
Kennzahlen EGSB			
Zulaufvolumen	[m ³ /d]	30	150
Verweilzeit	[d]	20	4
Raumbelastung	[kg CSB/m ³ *d]	1.8	8.8
Hydr. Auslastung	[%]	14	75
CSB Auslastung	[%]	12	60

Aufgrund der Resultate aus den UASB Laborversuchen und den Erkenntnissen des grosstechnischen EGSB Reaktors ist bei einer hydraulischen Verweilzeit von 4 Tagen und einer Raumbelastung von $8.8 \text{ kg CSB}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ kein signifikanter Rückgang des Abbaus organischer Substanz resp. der spezifischen Biogasproduktion zu erwarten. Um die bisherigen Werte stabil und gesichert zu erreichen, ist eine Vergrösserung des aktiven Reaktorvolumens durch Zugabe von 10 – 15 t Pellet TR sinnvoll.

8. Medienmeldung Schaffhauser Nachrichten

<<Schaffhauser Nachrichten / Donnerstag 27. März 2003, Region

Bioenergie AG stellt ihren Betrieb ein

Die Bioenergie AG ist in Schwierigkeiten und stellt vorübergehend den Betrieb ein. Für die Mitarbeiter werden Lösungen gesucht.

VON ERWIN KÜNZI

Die Bioenergie Schaffhausen AG will ihren Betrieb auf dem Ebnet vorübergehend einstellen. In einem kurzen Communiqué, das gestern verbreitet wurde, heisst es: «In der Vorbereitung zur Abnahme der Anlage wird der Betrieb vorübergehend unterbrochen. Er soll dann wieder aufgenommen werden, wenn die Leistungsdaten der Anlage inkl. allen Sicherheits- und Umweltauflagen erreicht sind und ein profitabler Betrieb gewährleistet ist. Für die fünf Mitarbeiter werden Lösungen gesucht.» Im Weiteren würden Geschäftsleitung und Verwaltungsrat erwarten, dass die vorgesehenen Massnahmen innerhalb der nächsten zwei bis drei Monate zu einer Lösung führen.

Ob dem so ist, muss allerdings bezweifelt werden. Bereits Anfang dieses Monats schrieb der Schaffhauser Stadtrat in einer Antwort auf eine kleine Anfrage von FDP-Grossstadtrat Walter Hotz, die Inbetriebsetzungsphase der Bioenergie AG habe zu viel Zeit in Anspruch genommen. Dadurch sei für die 2B AG, die Patentinhaberin, Hauptaktionärin und Anlagelieferantin der Bioenergie AG, eine schwierige Situation entstanden. «Es wird nötig sein», so der Stadtrat wörtlich, «in den nächsten zwei bis drei Wochen das erforderliche Kapital für die 2B AG bereitzustellen, da sonst das Risiko besteht, dass die 2B AG und damit in der Folge eventuell auch die y AG ihre Geschäftstätigkeit einstellen müssen.» Diese Suche nach zusätzlichem Kapital ist immer noch im Gange, wie Fritz Widmer, der als Vertreter der Etawatt, der Energiedienstleistungsfirma der Stadt Schaffhausen, als Vizepräsident im Verwaltungsrat der Bioenergie AG sitzt, gegenüber den «Schaffhauser Nachrichten» bestätigte. Es müsse in nächster Zeit eine Entscheidung fallen; falls keine neuen Investoren gefunden würden, könne dies das Ende der Bioenergie AG bedeuten, so Widmer, der sonst keine weiteren Auskünfte geben wollte.

Technisch hochinteressant

Falls die Bioenergie AG tatsächlich scheitert, würde damit ein technisch hochinteressantes Projekt ein Ende finden, das im Jahr 2000 mit grossen Hoffnungen gestartet worden war. Mit Hilfe einer neuartigen Technologie sollte aus überschüssigem Wiesengras und aus Rheingeschwemmsel neben Fasern für Isolationsmaterial und Proteinkonzentrat für Tierfutter auch Biogas erzeugt werden, das sich mittels Wärme-Kraft-Koppelung als Strom und Wärme nutzen lässt.

Stadt beteiligte sich

In das Projekt, das in der Fabrikhalle der ehemaligen Seilfabrik im Ebnet eingerichtet wurde, sind bisher rund sieben Millionen Franken investiert worden. Auch die Stadt beteiligte sich über die Städtischen Werke mit 400 000 Franken an der Bioenergie AG. An der Sitzung des Grossen Stadtrats vom 20. März 2001, an der dieser Kredit gutgeheissen wurde, gab es nur Lob für das Vorhaben. Von einer «fast genialen Anlage» sprach die SP, für die CVP war sie «ein Leitbild der Nachhaltigkeit», und FDP-Fraktionssprecher Christian Bächtold meinte: «Wäre ich ein Grüner, ich würde gleich abheben.» Am 20. Juni 2001 wurde die Aufrichte des Bioreaktors, der zentralen Komponente der gesamten Anlage, gefeiert, und Stadtpräsident Marcel Wenger bezeichnete in seiner damaligen Ansprache die Bioenergie AG als «wegweisend».

Kinderkrankheiten

Die Anlage erlebte einen befriedigenden Start. Gewisse Kinderkrankheiten verhinderten aber, dass die erwartete Leistung erreicht wurde. Bei voller Produktion sollte die Schaffhauser Bioraffinerie jährlich 2000 Tonnen Fasern, 8,8 Millionen Kilowattstunden Biogas, 1 Million Kilowattstunden Ökogas, 3 Millionen Kilowattstunden Ökostrom, 4 Millionen Kilowattstunden Ökowärme und 700 Tonnen Proteinkonzentrat produzieren. Diese ehrgeizigen Ziele konnten bis heute nicht erreicht werden, und entsprechend fehlten die erwarteten Einnahmen von über 2 Millionen Franken pro Jahr. Zusätzlich traten Anfang 2003 durch den Betrieb der Anlage in den Quartieren Ebnet und Niklausen Geruchsbelästigungen auf, deren Beseitigung zusätzliche bauliche Massnahmen nötig machten.

Pionierbetrieb

Nach der gestrigen Mitteilung ist das weitere Schicksal der Bioenergie Schaffhausen AG offen. Für alle Beteiligten bleibt nur die Hoffnung, dass sich für den ökologischen Pionierbetrieb doch noch rechtzeitig neues Kapital finden lässt. Bei der Bioenergie Schaffhausen AG im Ebnet in Schaffhausen wird laut Angaben der Firma in nächster Zeit nicht mehr gearbeitet. >>

9. Quellen

- Baier U, Grass S. (2001). Bioraffination of Grass, Anaerobic Digestion 2001 – 9th World Congress for Anaerobic Conversion for Sustainability, Antwerpen 2001
- Biothane, (2002), www.biothane.com, Homepage der Firma Biothane Systems Intl, NL, Stand 12.2002
- Campos JR, Foresti E, Camacho RDP. (1986). Anaerobic wastewater treatment in the food processing industry: two case studies. *Water Science and Technology*; 18(12): 87-97.
- Craveiro AM, Soares HM, Schmidell W. (1986). Technical aspects and cost estimations for anaerobic systems treating vinasse and brewery / soft drink wastewaters. *Water Science and Technology*, 18(12): 123-134.
- Cronin C, Lo KV. (1998). Anaerobic treatment of brewery wastewater using UASB reactors seeded with activated sludge. *Bioresource Technology*, 64: 33-38.
- Delavy P, Baier U. (2002). Bioenergie, Protein & Fasern aus Gras: Monitoring des Biogasprozesses, Jahresbericht BFE Projekt 36108, Dezember 2002.
- Diem H. (2000). Anaerobe Vergärung von Restwasser der Bioethanolproduktion. Semesterarbeit Biot 97/00, Abteilung Biotechnologie, Hochschule Wädenswil - Fachhochschule Zürich, Wädenswil. pp. 52.
- Dinkel F, Theune M. (2000). Beurteilung der Herstellung von Strom, Fasern und Protein aus Gras. Studie zur Ermittlung der Umweltauswirkungen (Ökobilanz), Carbotech AG, Basel
- Driessen W, Tielbaard M, Vereijken T. (1994). Experience on anaerobic treatment of distillery effluent with the UASB process. *Water Science and Technology*, 30(12): 193-201.
- Gulmez B, Ozturk I, Alp K, Arikan OA. (1998). Common anaerobic treatability of pharmaceutical and yeast industry wastewater. *Water Science and Technology*, 38(4-5): 37-44.
- Hesselmann R. (2001). Aus Gras wird Energie – Die 1. technische Grasvergärungsanlage in der Schweiz, BioTech 2001 – 5th Conference for Applied Biotechnology, Wädenswil, 2001.
- Kalyuzhnyi S, de los Santos LE, Martinez JR. (1998). Anaerobic treatment of raw and preclarified potato-maize wastewaters in a UASB-Reactor. *Bioresource Technology*, 66: 195-199.
- Niklaus N. (2000). Anaerobe Vergärung von Gemüseabwasser im UASB-Reaktor. Semesterarbeit Biot 98/01, Abteilung Biotechnologie, Hochschule Wädenswil - Fachhochschule Zürich, Wädenswil.
- Scheurer K. (2000). Bestimmung der anaeroben Abbaubarkeit von Schlempe aus der Bioethanolproduktion, HSW F&E Bericht 32.210.99.022
- Souza ME. (1986). Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors. *Water Science and Technology*, 18(12): 55-69.
- Williams DW, Schleef D, Schuler A. (1999). Anaerobic digestion of brewery wastewater for pollution control and energy. *Biomass: A Growth Opportunity in Green Energy and Value Added Products*. Proceedings of the 4th Biomass Conference of the Americas, Oakland, CA. Elsevier Science.