

Schlussbericht vom Dezember 2004

Bau und Betrieb einer Perkolationsanlage im Pilotmasstab zur Aufbereitung von Bioabfällen

Projekt Nr. 38714 Vertrag Nr. 86714

Ausgearbeitet durch

Gabriele Schober, Nova Energie
Arthur Wellinger, Nova Energie
Christian Widmer, AFAG-Engineering

Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Auftragnehmer:

AFAG Engineering, Hölzlistrasse 9, 4102 Binningen

Autoren:

Gabriele Schober

Arthur Wellinger

Christian Widmer

Impressum Titel: Bau und Betrieb einer Perkolationsanlage im Pilotmasstab

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogramms „Energie und Umwelt“ des Bundesamts für Energie BFE erstellt. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 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 · Tel. 021 312 05 55 · Fax 071 440 02 56

enet@temas.ch · www.energieforschung.ch - www.energie-schweiz.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Abstract.....	5
3	Einleitung.....	6
4	Projektziele	7
5	Material und Methoden	8
5.1	Die Perkulationsanlage	8
5.2	Grünabfall.....	9
5.3	Analytik	11
6	Resultate der Hydrolyse	13
6.1	Einfluss der Verweilzeit auf den CSB-Austrag	13
6.2	Einfluss der Bewässerungszeit auf den CSB-Austrag.....	15
6.3	Einfluss der zugeführten Luftmenge auf den CSB-Austrag	18
6.4	CSB-Austrag bei Steigerung der täglichen Perkulationsdauer	19
6.5	Einfluss der Kontaktzeit des Perkulationswassers auf den CSB-Austrag	20
7	Gasausbeuten.....	21
7.1	CSB-Abbau im Biogasfermenter	21
7.1.1	Phase 1	21
7.1.2	Phase 2	22
7.2	Biogaspotential	23
7.3	Feststoffaustrag	25
7.3.1	Sandaustrag.....	25
7.3.2	Faserstoffabscheidung	26
8	Massen- und Energiebilanzen.....	27
9	Bestimmung des Kompost-Reifegrades	28
10	Investitionsabschätzung.....	30
11	Schlussfolgerungen	31
12	Abkürzungen.....	32
13	Literatur	32
14	Anhänge	33

1 Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass Grüngut mittels Perkolation und anaerober Vergärung - einem Verfahren, welches für Restmüll entwickelt wurde - effizient zu Kompost und Biogas umgesetzt wird. Das Perkolationsverfahren besteht im Prinzip aus einem Perkolator, in dem das Abfallmaterial aerob aufbereitet und die gelösten Substanzen bei 45°bis 50°C ausgewaschen werden, sowie einem mesophilen Biogasfermenter, in dem die Reinigung des beladenen Waschwassers stattfindet. Dabei setzen Methanbakterien die gelöste Organik zu Biogas um. Das gereinigte Waschwasser wird anschliessend in den Perkolator rezykliert.

Dieses System unterscheidet sich vor allem durch deutlich kürzere Verweilzeiten von den üblichen Vergärungssystemen: Die Abtrennung des belasteten Abwassers vom strukturreichen Abfallmaterial ermöglicht eine problemlose Kompostaufbereitung mit kürzerer Rottedauer. Die Vergärung des Abwassers im Hybridreaktor kann bei sehr kurzen Aufenthaltszeiten von 3 - 4 Tagen durchgeführt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Effizienz der Perkolation von Grüngut und der anschliessenden Vergärung durch Optimierung chemisch-physikalischer, verfahrenstechnischer und mechanischer Parameter deutlich zu steigern. Die Versuche wurden in einer batch betriebenen Perkolationsanlage im Pilotmasstab (1 m³) und einem anaeroben Hybridfilter (4m³) durchgeführt.

Durch die geeignete Wahl von Perkulationswassermenge, Belüftungsrate und der Optimierung mechanischer Parameter konnte die aerobe Hydrolyse, d.h. der CSB-Austrag auf 340kgCSB/t Bioabfall gesteigert werden.

Der Fermenter konnte unter optimierten Bedingungen mit Raumbelastungen bis zu 5.6kg CSB/m³*d und Aufenthaltszeiten über 1.5 Tagen gefahren werden. Das Optimum lag bei 4 Tagen mit einer Gasausbeute von 53m³/t Grüngut. Die höchste erzielte Gasausbeute betrug 85m³ pro Tonne.

Das verwendete Material der Kompostieranlage Tägerschen wies einen sehr hohen Anteil an ligninhaltigem Gartenabraum auf und hatte daher ein tiefes Gaspotential. In Batch-Versuchen, bei welchen das gesamte Material ohne Perkolation vergärt wurde, konnten nur Gaserträge zwischen 35m³ und 69m³ pro Tonne Grüngut erzielt werden. Die entsprechenden Gasausbeuten aus dem Perkulationswasser lagen bei rund 75% der Werte mit Vollvergärung, d.h. zwischen 25m³ und 53m³ Gas pro Tonne eingebrachtem Grüngut.

Nach der Behandlung erreichte der produzierte Kompost den Rottegrad IV.

Die Ergebnisse zeigen, dass Grüngut mittels einer Perkulationsanlage effizient behandelt werden kann. Innerhalb von 3 bis 4Tagen Behandlungszeit werden 75% des Gasertrages erreicht im Vergleich zu einer konventionellen Vollvergärung bei 12 bis 20 Tagen Aufenthaltszeit. Zudem ist das ausgelaugte Material bereits aerob und damit ohne NH₄-belastete Abluft. Damit kann auf eine geschlossene Halle mit Abluftbehandlung verzichtet werden. Trotz reduziertem Gasertrag ist der ganze Prozess immer noch energetisch positiv.

2 Abstract

The percolation process is a new two-step, two-phase system for waste treatment with biogas generation.

The main components of a percolation system are the percolator itself and the anaerobic digester. In the percolator, the organic compounds are aerobically hydrolyzed. This is the first step of the percolation process.

While the waste material passes the tank in a plug-flow mode, low molecular products are washed out at 45 ° to 50°C to obtain high charged wastewater, which is then fed to the digester. Aerating and stirring to improve aerobic hydrolysis, heat generation, and to ensure a regular washout of the whole material enhance the leaching procedure in the percolator.

In the anaerobic hybrid reactor, the second step of the percolation process occurs: the organic matter is degraded to biogas at mesophilic temperatures (37 °C). The overflow water is then recycled to the percolator to be reloaded with organic compounds. As biowaste is rich in sand and fibers, a sand separator and a sieve are integrated into the system to avoid fermenter plugging.

So far, the process has never been applied with biowaste. For this reason, the percolation behavior of biowaste was investigated. The main focus of the research was put on the efficiency of the aerobic percolation procedure. An efficient percolation process is characterized by a high amount of soluble organic substances extracted from the biowaste. In the present work, the effects of varying volumes of washing water, aeration rates and the influences of the stirring frequency on the amount of soluble substances expressed as COD were studied in order to optimize the percolation procedure.

In the 1m³ pilot batch percolator, followed by a 4m³ hybrid anaerobic filter, source separated household and yard waste was percolated. Chemical-physical, biological and process parameters were optimized in order to improve COD removal and consequently gas yield. Increasing the rate of percolation water from 1 m³ to 8 m³/m³*d at a retention time of 2 days in the percolator, the amount of extracted COD could be increased by a factor of seven.

Variation of the aeration rate between 0 and 12 m³/m³*h demonstrated an optimal COD extraction at 6 m³/m³*h.

Under best operational conditions it was possible to achieve loading rates in the digester of 5.6kg COD/m³*d at HRTs of 1.5 days or higher. The optimum was reached at a retention time of 4 days with a gas yield of 53m³ per ton of green waste.

The material used over the entire experiments from a near by composting place was primarily composed of yard waste a demonstrated a very low gas potential. In lab-scale batch experiments, with the entire green waste, gas yields of 35m³ to 69m³ per ton of green waste were determined. The correspondent gas yields after percolation reached about 75% thereof, i.e. values between 25m³ and 53m³ per ton of green waste.

3 Einleitung

Der Perkulationsprozess ist ein neues zweistufiges Verfahren zur Behandlung von biogenen Abfällen. Die Produkte bei diesem System sind ein ausgereifter Kompost und Biogas. In der ersten Stufe des Prozesses wird der Bioabfall aerob hydrolysiert und die wasserlöslichen Abbauprodukte werden durch das Waschwasser ausgetragen. Dieses beladene Wasser wird dann in einem zweiten Schritt dem Anaerobfermenter zugeführt, wo durch die Abbauprodukte der anaeroben Mikroorganismen die organische Fracht zu Biogas umgesetzt wird. Das gereinigte Wasser wird rezykliert und erneut dem Auswaschprozess zugeführt.

Ein zweistufiges Perkulationsverfahren mit anaerober Hydrolyse wurde zuerst von Gosh et al. [1] entwickelt, um den Abbau organischer Abfälle auf Deponien zu beschleunigen. Wellinger und Widmer [2], [3] entwickelten dieses System zur Behandlung von Restmüll weiter, indem sie die Hydrolyse unter aeroben Bedingungen einführten. Inzwischen verwerten in Süddeutschland zwei grosstechnische Perkulationsanlagen der Firmen "Wehrle-Werke AG" [4] und „ISKA-GmbH“ [6] je 20'000 Tonnen Restmüll im Jahr. Dabei wird auch ein energiereicher Brennstoff hergestellt (RDF). Der Vorteil der Behandlung von Restmüll in einer Perkulationsanlage ist die Steigerung des Brennwertes bei gleichzeitiger Reduktion des Abfallvolumens. Dies ist vor allem dann interessant, wenn das Abfallmaterial der Verbrennung zugeführt werden soll. Eine dritte Anlage von 130'000 Jahrestonnen ist zur Zeit in Sydney im Bau.

Die optimierte getrennt Sammlung von Biomüll in der Schweiz macht es möglich, aus dem praktisch inertstofffreien Biomüll, neben dem Biogas einen verwertbaren Kompost herzustellen. Die Erfahrungen mit Restmüll können aber nur bedingt auf Biomüll übertragen werden. Auf Grund des Forschungsbedarfs mit Grüngut ist die vorliegende Arbeit durchgeführt worden.

4 Projektziele

Bisher sind keine Untersuchungen zur Perkolation mit Grünabfällen durchgeführt worden. In der vorliegenden Arbeit wird deshalb das Perkulationsverhalten von Grüngut geprüft. Der erste Schritt der Hydrolyse und das Auswaschen der löslichen Abbauprodukte stehen dabei im Vordergrund der Untersuchungen. Insgesamt soll das System aber im geschlossenen Kreislauf gefahren werden können.

Folgende Untersuchungsziele wurden gesetzt:

- Bestimmung der idealen Verweilzeit des Grünguts im Perkulator
- Optimierung der Hydrolyse durch die Wahl der effektivsten Belüftungsrate
- Bestimmung der besten Waschwassermenge
- Bestimmung des Biogaspotentials für das verwendete Grüngut und das Abbaupotential der organischen Fracht im Biogasfermenter
- Ermitteln der Kompostqualität durch den Rottetest

Mit den optimierten Parametern wird eine Massenbilanz sowie eine Energiebilanz mit der höchsten ermittelten Biogasausbeute für eine Anlage mit 2000 Jahrestonnen erstellt.

5 Material und Methoden

5.1 Die Perkulationsanlage

Die wichtigen Elemente einer Perkulationsanlage sind der Perkolator und der Anaerobfermenter (siehe Abbildung 1). Obwohl die Pilotanlage um den Faktor 300 kleiner ist als die Anlage der ISKA in Buchen, wurden der Perkolator und der Fermenter mit identischem Design ausgelegt. Hauptunterschied ist der batch-betrieb des Perkolators.

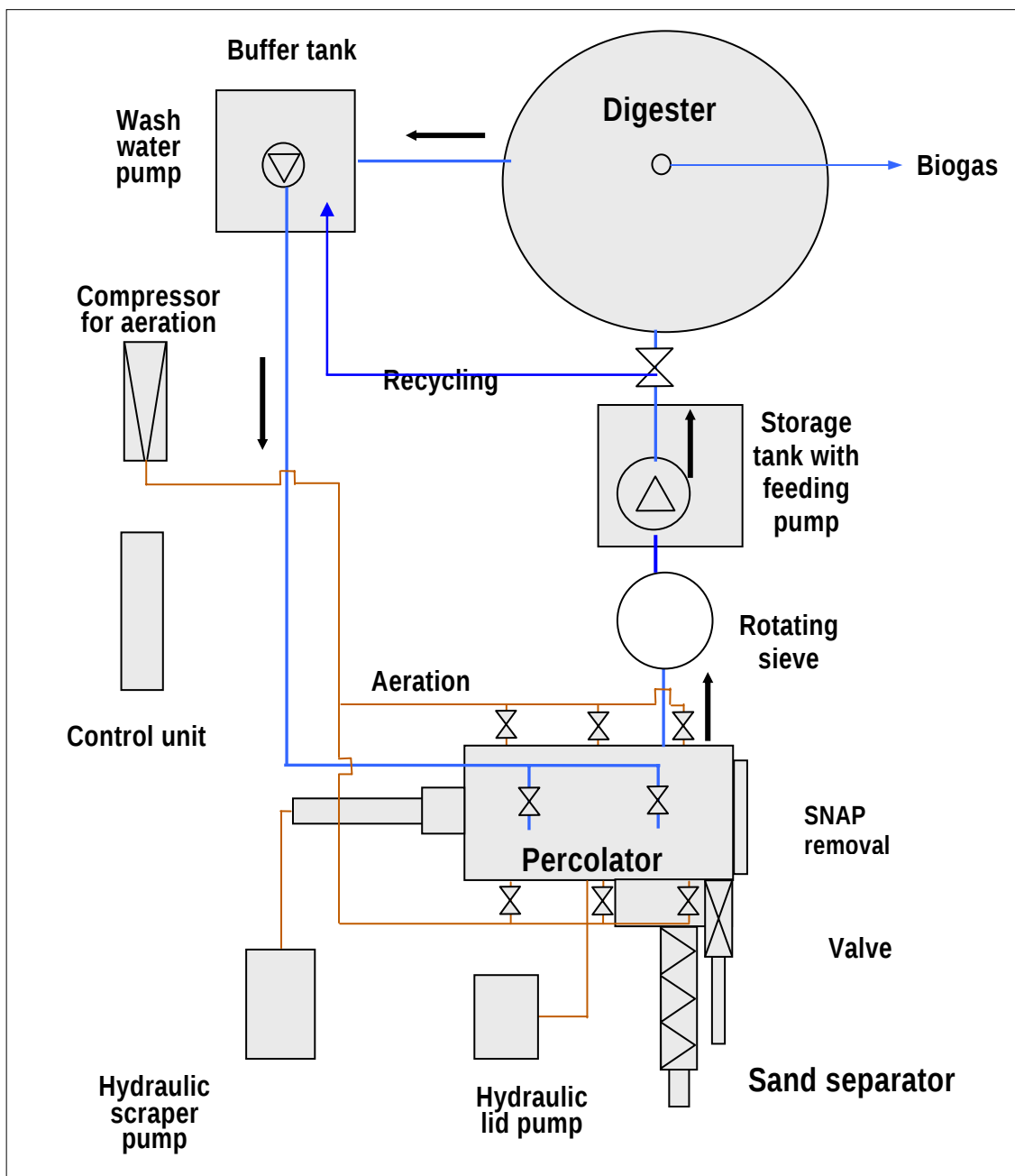


Abbildung 1: Die installierte Perkulationsanlage im Pilotmasstab

Das Abfallmaterial wird mit Hilfe eines Krans in den Perkulator (1 m^3) gefüllt, wo es batch-weise behandelt wird. Zur Unterstützung der aeroben Hydrolyse wird Pressluft über 6 seitlich angebrachte Düsen eingeblasen, was die aerobe mikrobielle Abbautätigkeit unterstützt. Die gelösten Abbauprodukte werden durch das Waschwasser ausgetragen, welches von oben über den Perkulatorinhalt versprüht wird. Das Wasser ist auf $50 \text{ }^\circ\text{C}$ temperiert, um die Abbauaktivität zu beschleunigen. Das beladene Perkulationswasser gelangt über einen Sandabscheider und ein Schwingsieb in einen Puffertank. Diese Reinigungsschritte sind notwendig, da die Pumpen und der Fermenter sonst verstopfen.

In einem ersten Vorversuch ist auf die Siebung verzichtet worden, was zweimal zum Trockenlauf der Pumpe führte, welche dabei jeweils verbrannte. Ein erstes statisches Sieb mit 2mm Maschenweite musste laufend von Hand abgereinigt werden, was extrem arbeitsaufwendig war. Für die Versuche der Phase II (Zusatzversuche) wurde ein Rotationssieb eingebaut mit zwei Siebkörben der Maschenweiten 6mm und 4mm. Vorversuche zeigten, dass bei 6mm nur wenige Partikel abgeschieden wurden. Die eigentlichen Versuche wurden daher einzig mit dem 4mm Sieb durchgeführt.

Ebenso wurde in Phase II nur noch ein Teilstrom dem Anaerobfilter zugeleitet. Ein Teil des Waschwassers wurde direkt in den beheizten Pufferspeicher rezykliert, um die CSB-Konzentration im Waschwasser zu erhöhen und damit auch bei hoher Raumbelastung ($5.6 \text{ kg CSB/m}^3 \cdot \text{d}$) die hydraulische Verweilzeit über 1.5 Tagen zu halten.

Das Perkulationswasser welches der Vergärung zugeführt wurde, durchströmte den Fermenter (4 m^3) von unten nach oben. Es handelte es sich um einen sog. Hybridfilter, bei welchem die untere Hälfte leer und die obere Hälfte mit Plastikfüllkörpern gefüllt ist, auf welchen sich die Bakterien ansiedeln. Das gereinigte Wasser wird in einem Vorratstank gesammelt, auf $50 \text{ }^\circ\text{C}$ vorgewärmt und in den Perkulator rezykliert.

Die Anlage wurde über eine zentrale Steuereinheit betrieben. In einem 15-minütigen Zyklus wurden während 8 Stunden pro Tag alle mechanischen Einbauten im Perkulator sowie die Pumpe, aus dem das gereinigte Waschwasser dem Perkulator zudosiert wird, reguliert. Die Waschwassermenge wurde über das Zeitintervall des Pumpenbetriebs gesteuert. Die Menge der eingepressten Luft wurde von Hand mit Hilfe eines Durchflussmessers eingestellt. Nach dem 8-stündigen Betrieb ruhte die Perkulationsanlage für 16 Stunden, ausser in den Versuchen, wo speziell etwas anderes erwähnt ist. Abb. 1 zeigt die Pilot-Perkulationsanlage im Überblick

5.2 Grünabfall

Der gehäckselte Bioabfall (Korngrösse 10 cm) wurde ein- bis zweimal wöchentlich vom *Zweckverband Abfallkompostierung Tägerwilen-Kreuzlingen* geliefert. Das Grüngut bestand vorwiegend aus Gartenabraum und zu weniger als 5% aus Küchenabfällen. Das Material wies einen TS-Gehalt von durchschnittlich 41.7% in Charge 1; 42.0 % in Charge 2 bzw. 38.5% in Charge 3 auf.

Der durchschnittliche OS-Gehalt betrug 59,9% (Charge 1); 58,7% (Charge 2) und 68.9% (Charge 3). Die Zeitspanne zwischen Anlieferung des Biomülls beim Kompostwerk bis zum Beginn der Perkulationsversuche betrug 3 bis 5 Tage.



Foto 1: Die Perkulationsanlage im Pilotmasstab mit dem 1m³-Perkolator (links) mit dem darunter liegenden Sandabscheider und dem 4m³ Fermenter (ganz rechts). Rechts vom Perkolator befindet sich der Pufferspeicher. Dazwischen wurde das Rotationssieb geschaltet (nicht sichtbar). Der zylindrische Fermenter in der Mitte hat nichts mit der aktuellen Anlage zu tun.

Die Versuche 1-6 wurden mit Charge 1 im Herbst 2001 durchgeführt. Das Grüngut hatte auf Grund der Jahreszeit einen hohen Laubanteil. Versuch Nr. 6 musste wegen einem Defekt an der Pumpe abgebrochen werden.

Charge 2 kam im Frühjahr und in den Sommermonaten 2002 zum Einsatz zur Durchführung der Versuche 7-18.

Die Dichte des Grünguts variierte stark zwischen 300 und 580 kg/ m³, wobei die zwei Herbstchargen (1 und 3 mit Versuchen 2.1 bis 2.5) die geringeren Dichten mit durchschnittlich 356kg/m³ bzw. 326kg/m³ aufwiesen. Im Frühjahr/Sommer (Charge 2) und im Winter (Charge 3 mit Versuchen 2.6 und 2.7) lagen die Durchschnitte bei 432kg/m³ bzw. 465kg/m³.

5.3 Analytik

Trockensubstanz (TS):

Das Probenmaterial wurde eingewogen und im Trockenschrank bei 105 °C für 24 Stunden getrocknet. Das Probenvolumen betrug 50 mL für die wässrigen Proben und 100-200 g für die festen Proben.

Organische Trockensubstanz (OS):

Die getrockneten Proben wurden in einem Muffelofen bei 550 °C für 4 Stunden verascht. Der Glühverlust wird als Mass für den organischen Anteil der TS verwendet.

Die festen Proben wurden vor der OS-Bestimmung mit einem Mixer zerkleinert.

CSB:

Der CSB wurde mit Küvettentests der Fa. Merck, Darmstadt, bestimmt. Die Differenz zwischen der Konzentration im Perkulatoroutput und im Fermenterablauf entspricht der eigentliche ausgewaschenen CSB-Konzentration (CSB_{netto}):

$$CSB_{\text{netto}} = CSB_{\text{Perkulatoroutput}} - CSB_{\text{Fermenterablauf}}$$

Zur Bestimmung des gelösten CSB wurde die verdünnte Probe mit einem Membranfilter (0,45 µm) filtriert.

Gasproduktion:

Die Gasproduktion wurde volumetrisch mittels einer handelsüblichen Gasuhr erfasst. Unter Berücksichtigung der Raumtemperatur und des Methananteils wurde das Gasvolumen auf Standardbedingungen (Nm³) umgerechnet.

Methan:

Die Gasprobe wurde mittels WLD-Gaschromatographen (Shimadzu GC-7A) auf den Methangehalt untersucht. Als Standard wurde eine Gasmischung mit 60 % Methan und 40 % CO₂ verwendet. Als Trägergas diente Helium.

Flüchtige Fettsäuren (Volatile Fatty Acids):

1,0 g Probe wurde in ein verschliessbares Reagenzglas vorgelegt und mit 10 mL Diäthyläther-Kresol-Lösung versetzt. Diese Lösung wurde mit 30 mg 2.6 Di-tert.-butyl-p-Kresol auf 1 Liter Diäthyläther hergestellt. Dabei diente Kresol als interner Standard. Zu dieser mit der Ätherlösung versetzten Probe wurden 100 µl HCl_{konz} zugeben, das

Reagenzglas verschlossen und von Hand gut durchmischt. Das Einspritzvolumen betrug 10 µL. Die Analyse erfolgte in einem Gaschromatographen (Carlo Erba Fractovap, Serie 2150) mit FID. Als Trägergas wurde Wasserstoff verwendet.

Die Trennsäule war eine Kapillarsäule (Fused Silica Kapillarsäule PERMABOND FFAP-DF-1.00, Macherey-Nagel AG, Oensingen). Die Temperatur der Kolonne wurde auf 150 °C, die des Injektors auf 175 °C eingestellt. Die Auswertung erfolgte mit einem separaten Integrator (Hewlett Packard 3390 A).

Leitfähigkeit:

Die Leitfähigkeit der wässrigen Proben wurde ohne Verdünnung mittels einer Sonde bestimmt (Dr. Lange).

NH₄-N:

Die Probe wurden mit de-ionisiertem Wasser verdünnt, so dass die Konzentration im Messbereich des Küvettentests (Fa. Merck, Darmstadt) von 4-80 mg/ L lag. Gemessen wurde die Konzentration des Ammoniums (NH₄).

Rottegrad:

Die Bestimmung des Rottegrads im Selbsterhitzungsversuch wurde nach der Anleitung der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. in drei Parallelansätzen durchgeführt [5]. Die Temperaturerfassung erfolgte stündlich durch eine automatische Temperaturerfassung (Bioblock Scientific, Fa. Avantec, Paris).

Die Versuche wurden direkt nach der Entnahme aus der Grüngutlieferung bzw. nach der Leerung des Perkolators angesetzt.

Gaspotential in Batch-Ansätzen:

In 1.5-L Behältern wurden 800 mL Schlamm vorgelegt. Der Schlamm wurde wöchentlich aus dem Fermenter abgezogen. Dazu wurden 200 mL de-ionisiertes Wasser (0-Probe) oder 200 g Probe zugegeben. In einem auf 35 °C temperierten Raum wurden die Ansätze inkubiert und die Gasproduktion erfasst.

6 Resultate der Hydrolyse

6.1 Einfluss der Verweilzeit auf den CSB-Austrag

Ein wichtiger Parameter bei der Perkolation ist die Verweilzeit vom Abfallmaterial im Perkolator. Deshalb wurden als Erstes Perkulationsversuche zur Bestimmung der idealen Verweilzeit durchgeführt. Das Grüngut wurde fünf Tage perkoliert und die Menge an ausgewaschenem CSB bestimmt. Die Gesamtmenge des ausgewaschenen CSBs nach fünf Tagen entsprechen 100%.

In Abbildung 1 ist die Menge täglich ausgewaschenen CSB prozentual dargestellt.

Der Versuch zeigt, dass am ersten Tag der Perkolation bereits 38,5% und am zweiten Tag 23,6% ausgetragen wurden. Nach 2 Tagen Perkolation waren demnach bereits 62% des gesamten CSBs ausgewaschen worden. Aus diesem Grund wurden die Perkulationsversuche mit zwei Tagen Aufenthaltszeit durchgeführt.

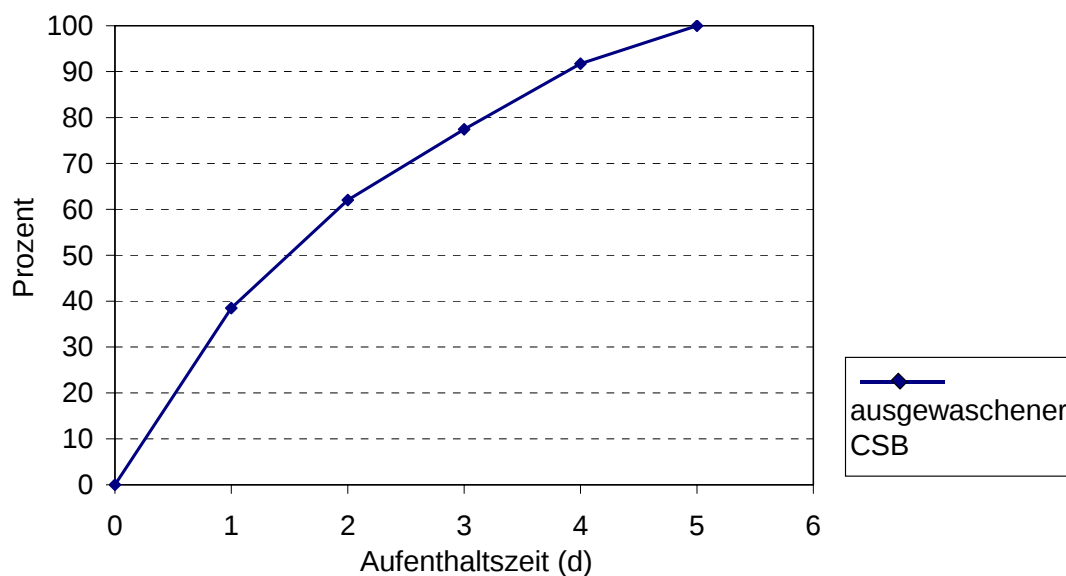


Abbildung 1: Der Anteil des täglich ausgewaschenen CSBs während der 5-tägigen Perkolation (Mittelwerte dreier Versuchsdurchläufe)

Die hohen CSB-Mengen, die am ersten Perkolationstag ausgewaschen werden, sind auf die bereits im Grüngut vorhandenen gelösten Stoffe zurückzuführen. Sie sind nicht durch Hydrolyse im Perkolator gebildet worden.

Eine Verlängerung der Aufenthaltszeit würde die Effizienz der Perkolation deutlich verringern: Am dritten Tag konnten nur noch 15,4% , am vierten Tag 14,2% und am fünften Tag lediglich 8,3% gewonnen werden.

Die Säurekonzentrationen waren nach der 16-stündigen Pause in der ersten Probe des jeweiligen Versuchstages am höchsten (siehe Abbildung 2). Dies ist durch die anaeroben Verhältnisse zu erklären, die während der Perkulationspause eintreten. Die während den Pausen gebildeten Säuren werden mit Beginn der Perkolation vom Waschwasser ausgetragen. Während dem Belüften wird eine weitere Säurebildung unterbunden. Ab dem dritten Tag geht die Säurebildung stark zurück, da die Menge der leicht löslichen Substanzen, aus denen die Säuren gebildet werden können, ebenfalls abgenommen hat. Der Anteil der kurzkettigen Fettsäuren am gesamten ausgewaschenen CSB_{netto} beträgt maximal 2% am ersten und zweiten Tag, danach beträgt er zwischen 0,1 und 0,8%. Das deutet auf weitgehend aerobe Verhältnisse hin.

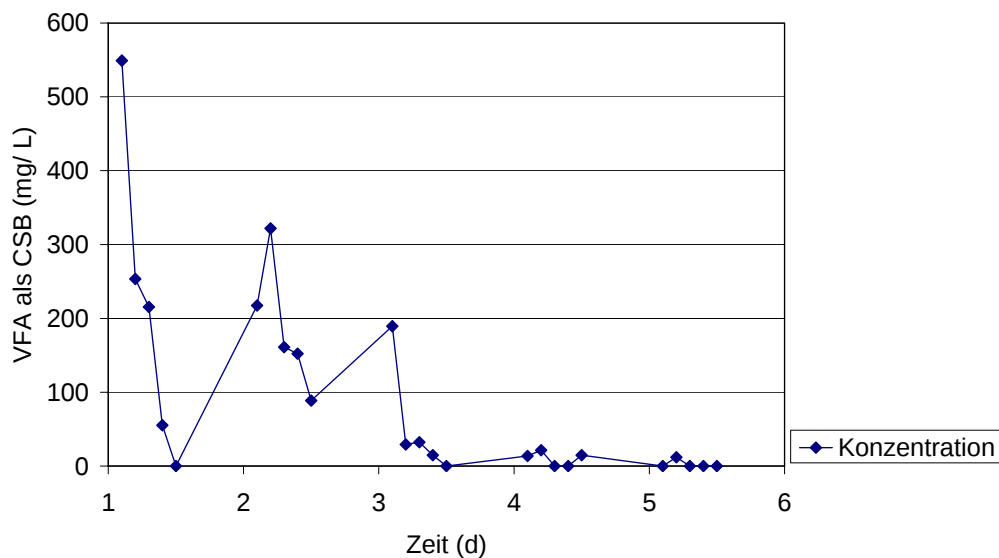


Abbildung 2: Fettsäurekonzentrationen während der 5-tägigen Perkolation (Mittelwerte dreier Versuchsdurchläufe), berechnet als CSB.

6.2 Einfluss der Bewässerungszeit auf den CSB-Austrag

Der Einfluss der zugeführten Menge Perkulationswasser wurde bei einer konstanten Belüftungsrate von $6 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{h}$ untersucht.

Die Bewässerungsrate wurde von 1 auf $8 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ gesteigert. Zur Untersuchung der Raten von 1 bis $4 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ diente Charge 1 (Abbildung 3), anschliessend wurden die Versuche - nach der Winterpause - von 4 bis $8 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ mit der Grüngutcharge 2 durchgeführt.

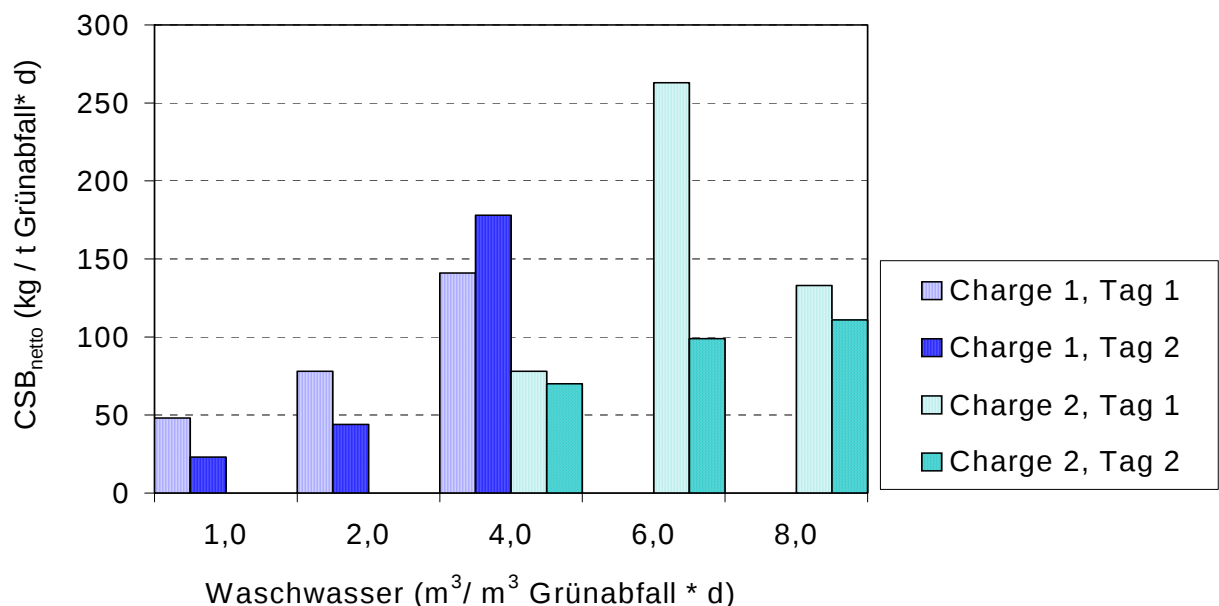


Abbildung 3: Auswaschen löslicher Substanzen (als CSB_{netto}) aus dem Grünabfall bei Waschwassermengen von 1 bis $8 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$.

Durch die Erhöhung der Wassermengen wurde eine deutliche Steigerung der ausgewaschenen CSB-Mengen erreicht.

Das Anheben der Waschwasserrate von 1 auf $4 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ bewirkte am ersten Perkolationsstag eine Zunahme des ausgewaschenen CSB um Faktor 3, für den zweiten Tag sogar eine Zunahme um Faktor 7. Das ergibt über beide Tage eine Steigerung von 36 auf $160 \text{ kg CSB} / \text{t}_{\text{Grüngut}} \cdot \text{d}$, also um das 4,5-fache.

Bei der Einstellung von $4 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ wurden die Versuche mit beiden Chargen durchgeführt, um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Die ausgetragene CSB-Menge war bei Charge 2 deutlich geringer als bei Charge 1, nämlich 74 statt $160 \text{ kg CSB} / \text{t}_{\text{Grüngut}} \cdot \text{d}$. Dies ist möglicherweise auf einen höheren Holzanteil in Charge 2 zurückzuführen.

Mit Charge 2 wurden am zweiten Tag der Auswaschung bei $6\text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ eine (im Vergleich zu 4 m^3) zusätzliche Steigerung von 35% erzielt, bei 8 m^3 noch eine weitere um 27%. Der CSB-Austrag konnte also – etwas spekulativ über beide Chargen hinweg – mit der Erhöhung der Waschwasser-Rate von 1 auf $8\text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ um 762% gesteigert werden.

Bei der Perkolation von Charge 2 wurde bei $6\text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ am ersten Tag eine grosse Menge CSB ausgewaschen. Bei diesem Versuch wurde offensichtlich Grüngut verwendet, welches einen höheren Anteil an löslichem Material aufwies. Da die CSB-Werte vom ersten Perkolationstag vor allem vom Grüngutmaterial und weniger von den Perkulationsparametern beeinflusst werden, dürfen die Ergebnisse von den jeweils ersten Versuchstagen generell nicht stark gewichtet werden.

Der Einfluss der verschiedenen Bewässerungsraten auf den Säuregehalt ist in Abbildung 4 deutlich zu erkennen: Bei der Steigerung des Wassermengen nahmen die Säurekonzentrationen - umgerechnet als CSB - im beladenen Perkulationswasser von 356 auf unter 50 mg/L ab.

Am ersten Perkolationstag entstanden bei Charge 1 durchschnittlich 272 mg Acetat/L und $140\text{ mg Propionat/L}$. Bei der Verwendung von Charge 2 lagen die Fettsäurekonzentrationen niedriger, nämlich bei 102 mg Acetat/L und 22 mg Propionat/L . Bei beiden Chargen sanken nach der Perkulationsdauer von 8 Stunden die Fettsäurekonzentrationen auf unter 20 mg Acetat bzw. unter 5 mg Propionat/L .

Am zweiten Tag erreichten die Fettsäurekonzentrationen zu Beginn 277 mg Acetat/L und 86 mg Propionat/L bei Charge 1 und 44 mg Acetat und 9 mg Propionat/L bei Charge 2. Während der 8-stündigen Perkolation nahmen die Säurekonzentrationen in allen Perkulationsläufen weiter ab, nämlich bei Charge 1 auf durchschnittlich 169 mg Acetat/L und 31 mg Propionat/L und bei Charge 2 auf 4 mg Acetat/L ; Propionat wurde keines gebildet. Aus Tabelle 1 kann die Zusammenfassung der Fettsäuremengen - bezogen auf eine Tonne Grüngut - bei den Wassermengen von 1 bis $8\text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ entnommen werden.

Da die Konzentrationen der C4-Fettsäuren und höher sehr niedrig waren ($< 20\text{ mg/L}$) und grösstenteils unter der Messgrenze lagen, wurden sie hier für die Interpretation der Ergebnisse vernachlässigt.

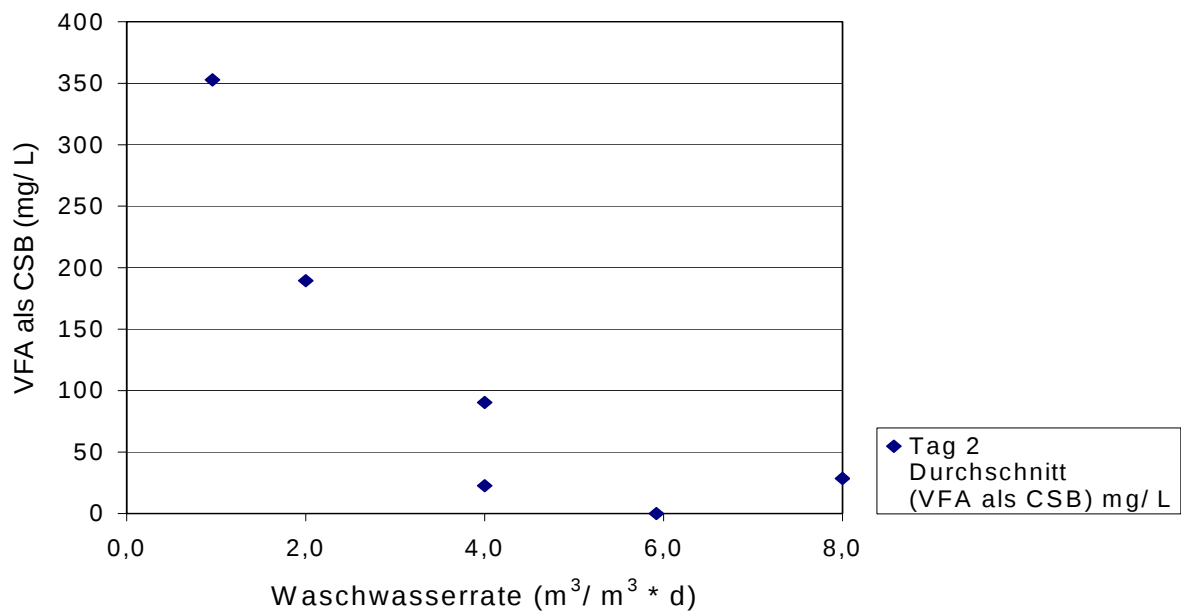


Abbildung 4: Die Fettsäurekonzentrationen, ausgedrückt als CSB, in Abhängigkeit von der Waschwasserrate.

Tabelle 1: Ausgewaschene Fettsäuremenge pro Tonne perkolierem Grüngutmaterial bei verschiedenen Wassermengen

Charge Nr.	Perkolationswasser ($\text{m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$)	Tag 1 (kg VFA/ t Input)	Tag 2 (kg VFA/ t Input)	Summe (kg VFA/ t Input)
I	1,0	0,458	0,847	1,305
I	2,0	1,990	0,842	2,832
I	4,0	1,817	0,952	2,768
II	4,0	0,036	0,164	0,201
II	6,0	1,162	0,000	1,162
II	8,0	0,900	0,508	1,408

6.3 Einfluss der zugeführten Luftmenge auf den CSB-Austrag

Um den Einfluss der Belüftungsrate auf die hydrolytische Aktivität im Perkolator zu untersuchen, wurde die Luftmenge von 0 auf 12 m³/m³·h schrittweise erhöht und die Menge des ausgewaschenen CSBs bestimmt.

Während des gesamten Zyklus von 15 Minuten wurde die Belüftungsdauer in allen Versuchen auf 5 Minuten eingestellt, daraus ergab sich eine Belüftungsdauer von 20 Minuten pro Stunde. Um verschiedene Belüftungsraten einzustellen, wurde die zugeführte Luftmenge in diesem Zeitintervall erhöht. Von besonderem Interesse war der Versuchsdurchlauf ohne Belüftung, da diese Einstellung einem quasi anaeroben System entspricht.

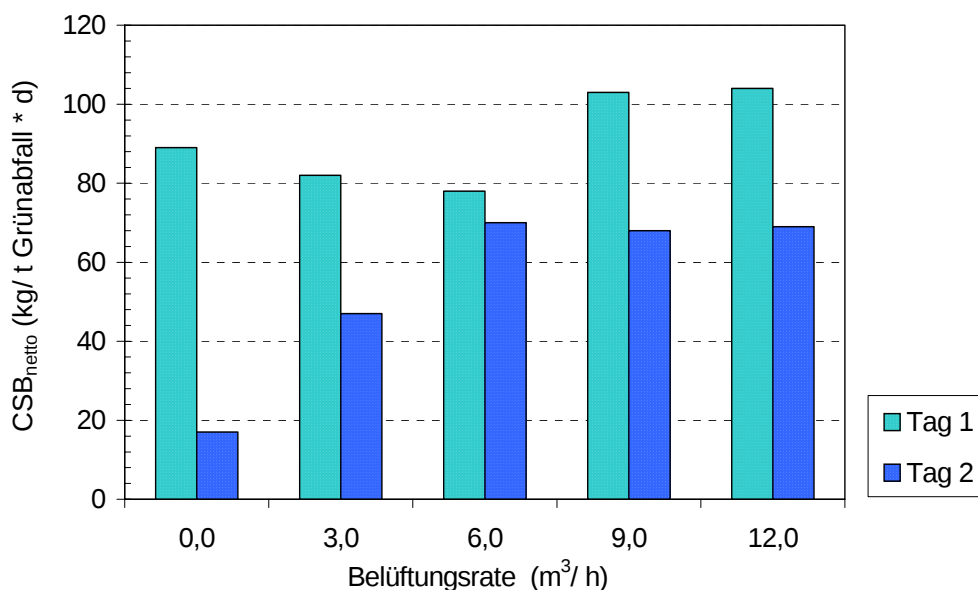


Abbildung 5: Ausgewaschener CSB in Abhängigkeit von der Belüftungsrate

Die am ersten Tag ausgewaschene CSB-Menge war unbeeinflusst von der Belüftungsrate, was die Beobachtung bei den Versuchen mit den Waschwassermengen bestätigt.

An den jeweils zweiten Tagen hingegen erreichte der, bei Belüftungsraten von 6 m³/m³·h und höher, aus dem Grüngut herausgelöste CSB rund 70 kg CSB/ kg*d. Bei Raten unter 6 m³/m³·h wurden deutlich geringere CSB-Mengen ausgewaschen, nämlich 17 kg CSB/ kg*d ohne aktive Belüftung und 47 kg CSB/ kg*d bei 3 m³/m³·h (Abbildung 5).

Die Belüftungsmengen haben auf die Bildung von Fettsäuren praktisch keinen Einfluss. Unter 6 m³/m³·h betrug die Fettsäurekonzentration im Mittel 41 mg CSB/ L, bei 6 m³/m³·h und höher war die durchschnittliche Konzentration 36 mg CSB/ L.

Die unveränderten Säurekonzentrationen zeigen, dass die anaerobe Aktivität auch bei Aussetzen der Luftzufuhr sehr gering ist: Sie erreichen während dem Waschvorgang etwas niedrigere Werte wie nach der 16-stündigen Pause der Perkulationsversuche, bei der die Luftzufuhr unterbrochen wurde und damit anaerobe Bedingungen aufweist (Tabelle 2).

Tabelle 2: Durchschnittliche Fettsäurekonzentrationen während den 2-tägigen Perkulationsläufen mit Belüftungsraten zwischen 0 und 12 m³/h.

VFA (mg CSB / L)	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
1. Tag	109	58	23	13	6
2. Tag	63	30	11	27	42

6.4 CSB-Austrag bei Steigerung der täglichen Perkulationsdauer

In zwei vergleichenden Perkulationsdurchläufen wurde untersucht, ob bei einer zweitägigen Perkulation ohne Unterbruch (total 32 Stunden) mehr CSB ausgewaschen wird als bei einer zweitägigen Perkulation während je 8 Stunden und einer 16-stündigen Unterbrechung.

Der Waschwasserverbrauch betrug stündlich 120 L. Die Perkulationsdauer im ersten Versuch wurde auf 8 Stunden, im zweiten auf 16 Stunden pro Versuchstag eingestellt. Dadurch ergab sich ein täglicher Wasserdurchsatz von 1 m³ bzw. 2 m³ (Tab. 4).

Durch diese Einstellungen wurde die mechanische Umwälzung wie die Gesamtluft- und Wassermenge verdoppelt.

Tabelle 3: Ausgewaschene CSB-Mengen nach 32 Stunden bei einer Perkulationsdauer von 8 bzw. 16 Stunden am Tag

Perkulationsdauer (h/ d)	Perkulationswassermenge (m ³ / d)	CSB _{ausgew.} 1. Tag (kg/ t Input)	CSB _{ausgew.} 2. Tag (kg/ t Input)	CSB _{ausgew.} Summe (kg/ t Input)
8	1	48	23	71
16	2	122	39	161

Die Erhöhung der Bewässerungsrate von 1 auf 2 m³/ d durch Verlängerung der Perkulationsdauer - bei der selben Bewässerungsrate von 120 L/ h - hatte einen Anstieg der CSB-Auswaschrates um rund 100 % zur Folge.

Dieser Versuch bestätigt eindrücklich die vorausgegangenen Versuche: Je länger und intensiver die Belüftungsrate und der Waschwasserdurchsatz sind, desto höher ist die CSB-Auswaschung.

6.5 Einfluss der Kontaktzeit des Perkolationswassers auf den CSB-Austrag

Während das Grüngut mit Waschwasser ausgelaugt wird, kann durch den Boden des Perkolators nur wenig Wasser abfließen, da die Siebschlitze verstopft sind. Erst bei Betätigung des Schubbodens werden sie gereinigt und das beladene Perkolationswasser kann den Perkolator verlassen. Das Intervall des Schubboden-betriebs definiert also die Kontaktzeit des Waschwassers mit dem Grüngut.

In der Regel wurde der Schubboden eine Minute nach Zyklusbeginn aktiviert. Da die Zugabe des Wassers zu Beginn des Zyklus einsetzte, ergab sich für den Normalfall eine Kontaktzeit von rund einer Minute.

Durch eine Verschiebung der Aktivierung des Schubbodens auf die achte Minute jedes Zyklus, konnte entsprechend auch die Kontaktzeit erhöht werden.

In beiden Fällen war der Schubboden fünf Minuten in Bewegung. Die Versuche wurden bei den Waschwasserraten von 4 und 8 m³/m³·d durchgeführt (Abb.6).

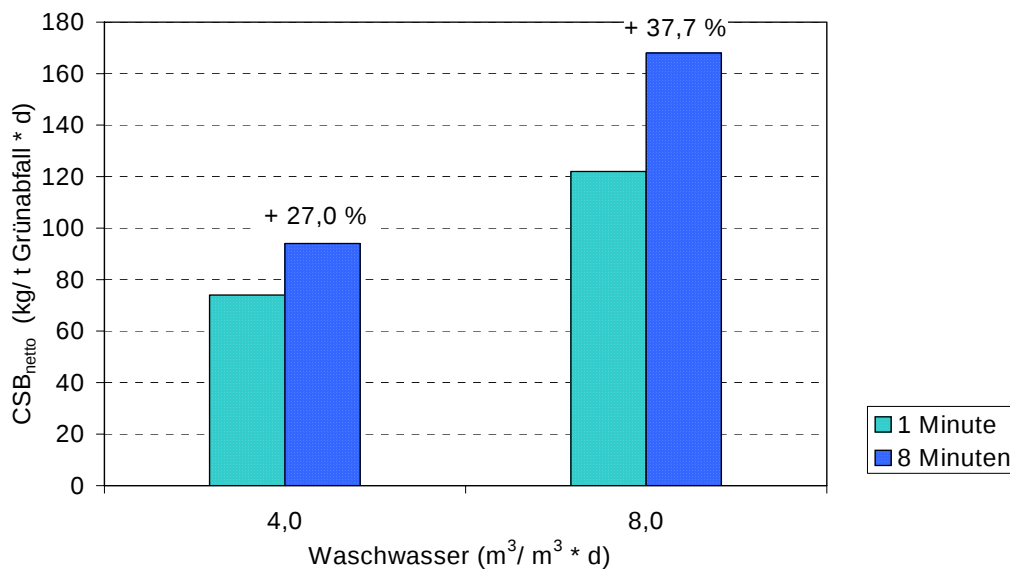


Abbildung 6: Menge ausgewaschenen CSBs bei zwei verschiedenen Kontaktzeiten im Perkolator (1 und 8 Minuten), untersucht bei 4 und 8 m³/m³·d Waschwasser

Durch die Verlängerung der Verweilzeit des Waschwassers von 1 auf 8 Minuten konnte bei beiden untersuchten Raten eine Zunahme des ausgewaschenen CSBs von 27% bzw. 38% festgestellt werden: Die Menge ausgewaschenen CSBs erhöhte sich von 74 auf 95 kg CSB/t.d bei $4 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ und von 133 auf 168 kg CSB/t.d bei $8 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$.

Interessant ist die Beobachtung, dass bei der höchsten untersuchten Waschwasserrate von $8 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ der Steigerungseffekt noch deutlicher ausgefallen ist, als bei 6 m^3 . Das mag mit der höheren Überflutung des Grüngutes im Zusammenhang stehen.

7 Gasausbeuten

7.1 CSB-Abbau im Biogasfermenter

7.1.1 Phase 1

Trotz sehr kurzer Aufenthaltszeiten im Fermenter war der durchschnittliche CSB-Abbau im Fermenter hervorragend, was durch die tiefen Konzentrationen im Fermenteraustrag widerspiegelt wird. Die CSB-Aufnahme im Perkolator blieb über die ganze Versuchsdauer einigermaßen konstant im Tagesschnitt (Tab.4). Die jeweils höchsten Tageswerte wurden zu Beginn der Perkolation am Morgen erzielt, wobei die Spitzenwerte jeweils am ersten Tag gemessen wurden. Die höchsten Werte für die Chargen 1 bis 3 betrugen 31'000 mg CSB/l, 71'600 mg/l bzw. 33'400 mg/l.

Tabelle 4: Durchschnittliche CSB Ein- und Austragskonzentrationen (Werte in mg CSB pro Liter Waschwasser)

Versuche	CSB-Konz. im Fermenteraustrag		CSB-Konz. im Perkolatoraustrag bzw. Fermentereingang	
	Tag 1	Tag 2	Tag 1	Tag 2
Charge 1 (Vers. 1-3)	3'200	4'100	17'200	14'700
Charge 2 (Vers. 7-16)	3'700	4'800	16'600	11'900
Charge 3 (Vers.2.1-2.7)	3'400	3'500	16'100	10'800

Die durchschnittliche CSB-Abbaurrate betrug in den Batch-Versuchen der Phase I (Chargen 1+2) jeweils 74% ($\pm 14\%$) am ersten Tag und 52% ($\pm 24\%$) am zweiten Tag eines Perkulationszyklus.

Der TS-Gehalt im Perkulationswasser betrug im Schnitt 1,9%, der OS-Gehalt 0,9 % . Das CSB :TS-Verhältnis erreichte 0,75 und das CSB :OS-Verhältnis 1,6 (siehe Tabelle Anhang). Das gereinigte Wasser im Fermenterablauf wies noch einen TS-Gehalt von 0,80 % (0,34 % OS) auf; das entspricht einem TS-Abbau im Fermenter von durchschnittlich 58 % und einem OS-Abbau von 62 %.

Die CSB-Konzentration des gereinigten Waschwassers (Überlauf des Fermenters) lag nie höher als 6,2 g CSB/ L, rund 20% davon waren gelöst. Es ist anzunehmen, dass dieser Rest-CSB auf anorganische Substanzen (beispielsweise Ammonium) zurückzuführen ist.

Die niedrigen Konzentrationen der Fettsäuren im Fermenterüberlauf (Abb. 4) zeigen den optimalen Verlauf der Methanogenese. Der Ammoniumgehalt lag während des gesamten Versuchszeitraums zwischen 0,3 und 0,7 mg/ L, die Leitfähigkeit, ein

Mass für den Salzgehalt, zwischen 5,8 und 10,2 mS/ cm, beide Parameter liegen im optimalen Bereich für die Methanogenese. Eine Kumulation über die rund 1.5 jährige Versuchsdauer war nicht festzustellen, was zwei Gründe haben kann: Erstens ist während der Belüftung m Perkolator immer ein Teil Stickstoff oxidiert und als N_2 ausgetragen worden. Zweitens gab es eine Verdünnung von rund 5% durch den Austrag von Wasser mit dem perkolierten Feststoff, welches durch Frischwasser ersetzt wurde.

Während den Versuchsreihen war die Menge des Wasserdurchsatzes zunehmend gesteigert worden. Wegen dem grossen Eintragsvolumen in den Fermenter sank die Verweilzeit im Anaerobfermenter von 4d bis auf 0,5 d. Zur Erreichung einer optimalen Gasausbeute ist aber eine gleichbleibende Verweilzeit von mindestens 1,5 d notwendig, wie frühere Versuche mit Restmüll gezeigt haben [3].

7.1.2 Phase 2

Mit dem verbesserten Verfahrensablauf konnte in Phase II der CSB-Abbau direkt im Fermenter bestimmt werden. Die klare Unterscheidung der Abbauraten im Waschwasser von Tag1 und Tag2 war aber nicht mehr möglich, da sich die CSB-Konzentration, aufgrund der direkten Rezyklierung von einem Teilstrom, über beide Tage ausglich.

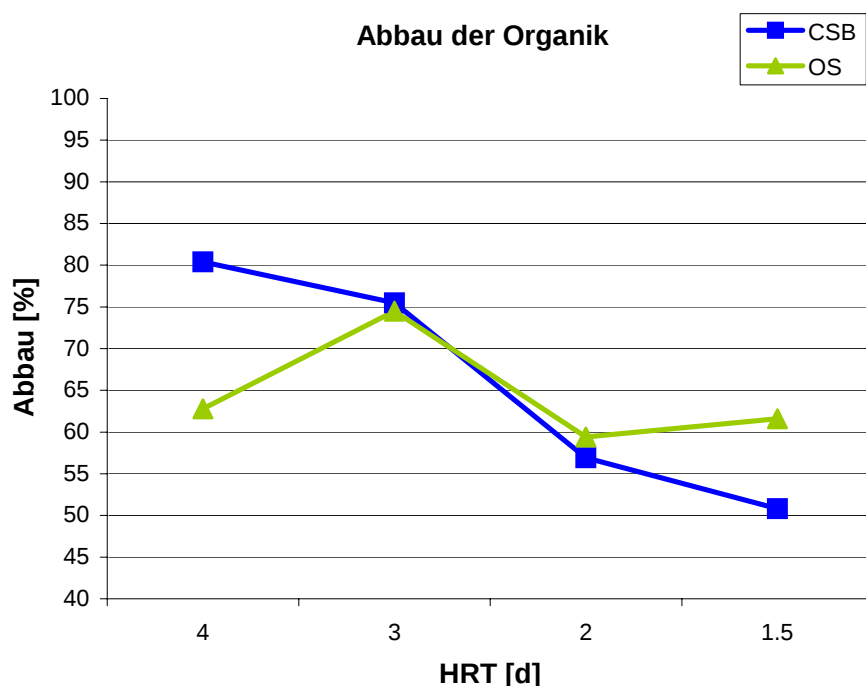


Abb.7 Abbau der Organik (CSB,OS) in Funktion der HRT

Die CSB-Abbauraten zeigen eine klare Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit im Fermenter (Abb.7). Bei 4 Tagen HRT liegt der durchschnittliche Wert mit 76.8% über dem in Phase I ermittelten Wert des ersten Perkolationstages von 74% (vgl. Tabelle im Anhang B). Der OS-Abbau, welcher nur je in einem Versuch ermittelt wurde, zeigt ein vergleichbares Verhalten. Daraus kann geschlossen werden, dass weitgehend alle organische Substanz in gelöster Form vorlag.

Der Methangehalt im Anaerobfermenter lag während den Versuchen zwischen 70 und 74%.

7.2 Biogaspotential

Da die **Biogasausbeute in Phase I**, wegen den extrem kurzen HRT im Fermenter, nicht direkt im Anaerobfermenter bestimmt werden konnte, wurde das Gaspotential in Batch-Versuchen ermittelt. Zur Bestimmung des Gaspotentials des Perkulationswassers wurde am zweiten Perkolationstag nach zwei Stunden Perkolation eine Probe gezogen und in Batch-Ansätzen vergoren. Die Konzentration an CSB entsprach in diesem Zeitpunkt in etwa dem Durchschnitt über zwei Tage.

Die durchschnittliche Gasausbeute der Phase I (Versuche 3 bis 12) betrug 204 L Gas/ kg CSB_{add.}. Die höchste erzielte Gasausbeute von 285m³ entspricht - unter Berücksichtigung der höchsten ausgewaschenen CSB-Menge von 336 kg CSB / t Input während der 2-tägigen Perkolation (Resultat nicht gezeigt) - rund 85 Nm³/ t Grünabfall. Das Minima lag bei rund 25m³/t Grünabfall.

In **Phase II** konnte die Ausbeute direkt im Pilot-Fermenter bestimmt werden. Analog zum prozentuellen Abbau (Abb.7) nahm natürlich auch die Gasausbeute in Funktion der Aufenthaltszeit zu (Abb. 8). Allerdings ist die lineare Abhängigkeit nicht zwingend gegeben. Die in etwa lineare Abnahme der OLR in Funktion der Aufenthaltszeit ist eine Folge der gleichbleibenden CSB-Konzentration im Waschwasser.

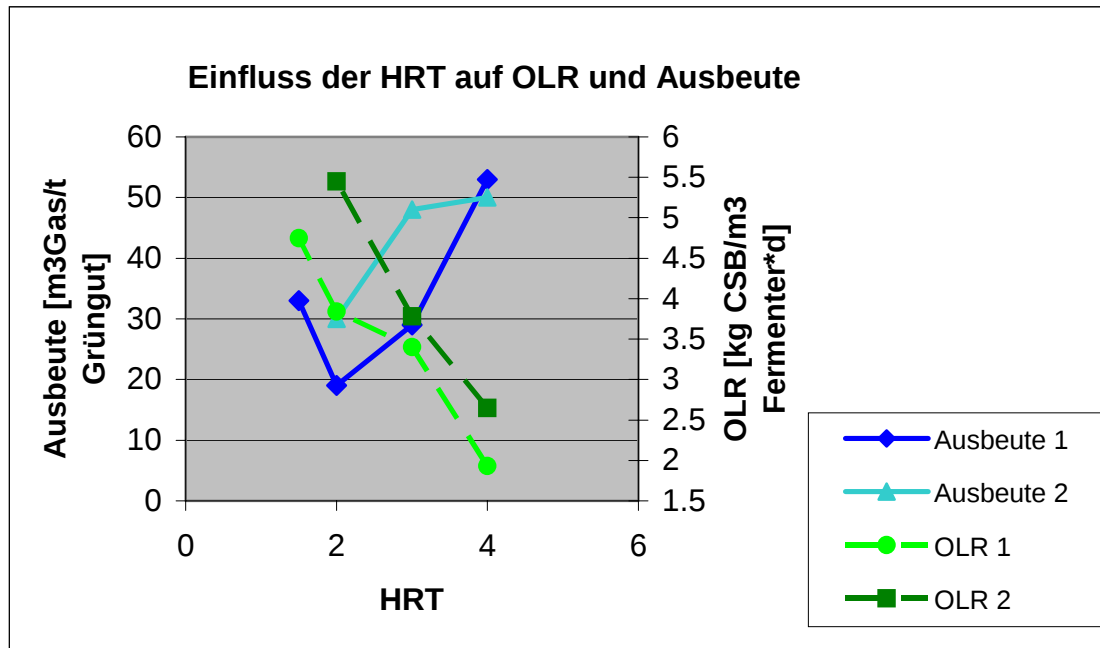


Abb.8 Gasausbeuten des Perkolationswasser in Phase II in Funktion der Aufenthaltszeit, bzw. Raumbelastung

In **Phase II** konnte die Ausbeute direkt im Pilot-Fermenter bestimmt werden. Analog zum prozentuellen Abbau (Abb.7) nahm natürlich auch die Gasausbeute in Funktion der Aufenthaltszeit zu (Abb. 8). Allerdings ist die lineare Abhängigkeit nicht zwingend gegeben. Die in etwa lineare Abnahme der OLR in Funktion der Aufenthaltszeit ist eine Folge der gleichbleibenden CSB-Konzentration im Waschwasser.

Es ist interessant festzustellen, dass mit dem verwendeten Material zwei Tage Aufenthaltszeit im Fermenter offensichtlich zuwenig waren. Dieser Leitwert stammte aus den Pilotversuchen von Wellinger und Widmer [3]. Die Resultate sprechen deutlich für eine hydraulische Verweilzeit von mindestens 4 Tagen.

Um die Effizienz des Perkolationsprozesses mit der Vergärung des gesamten Grünabfalls vergleichen zu können, wurde in Batch-Versuchen das Material der Charge 2 direkt vergoren. Der dabei erzielte Gasertrag wurde mit demjenigen der Batch-Vergärung von Perkolationswasser der gleichen Grüngutlieferung verglichen. Als Gegenkontrolle wurde das ausgelaugte Grüngut ebenfalls in Batch-Ansätzen auf das Restgaspotential untersucht.

Drei unabhängige Ansätze mit demselben Material wurden entweder direkt vergoren, oder mit den optimalen Einstellungen (Waschwasserrate $6\text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$; Belüftungsrate $9\text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{h}$; Kontaktzeit 8Min.) perkoliert. Das Waschwasser und das ausgelaugte Grüngut wurden jeweils in Doppelansätzen ebenfalls vergärt.

Das frische Material wies ein Gaspotential von $34\text{ Nm}^3/\text{t}$, das beladene Waschwasser, das während der Perkolationsläufe produziert wurde, von $25\text{ Nm}^3/\text{t}$ auf (75%). Die produzierte Gasmenge des ausgelaugten Grünguts (Kontrolle) erreichte $19\text{ Nm}^3/\text{t}$.

Die Versuche zeigten, dass 75% des im Grüngut vorhandenen Biogaspotentials bei der Vergärung des Perkulationswassers erreicht werden konnte.

Die Summe der gebildeten Gasmenge aus Perkulationswasser und ausgelaugtem Grüngut liegt über der Gasmenge, die bei der Vergärung von frischen Grüngut entstand. Wahrscheinlich ist, dass durch die hydrolytische Aktivität der Mikro-Organismen im Perkolator zusätzlich Substanzen aus der festen Grüngut-Matrix herausgelöst wurden. Dieses Gaspotential blieb bei der direkten Vergärung des Grünguts ungenutzt.

Die Gasausbeute des verwendeten Grünguts war mit 25 bis maximal 85 Nm³/ t insgesamt aber relativ niedrig. Dies ist wahrscheinlich auf den hohen Holzanteil und den geringen Anteilen an Küchenabfällen (<5%) zurückzuführen.

7.3 Feststoffaustrag

7.3.1 Sandaustrag

Der Sandaustrag blieb über die gesamte Versuchsphase unverändert. Trotz der Einfachheit der Konstruktion hat er sich hervorragend bewährt. In den eingangs zitierten Grossanlagen mit Vollmüll stellt die Sandabscheidung eine echte Herausforderung dar. Die gute Funktion in der Pilotanlage hängt wohl damit zusammen, dass zum einen das sandhaltige Waschwasser über die ganze Länge des Austrages direkt in die Wanne des Sandabscheiders fällt und nicht, wie bei der Grossanlage, über einen Sammelkanal – in welchem der Sand sedimentiert – wegtransportiert werden muss. Zum anderen ist die hydraulische Belastung im Sandabscheider der Pilotanlage sehr klein und gibt dem Feststoff genug Raum und Zeit um sich abzusetzen. So ist es auch zu erklären, weshalb neben dem Sand auch grössere Holz- und Halmstücke sowie koagulierende organische Substanzen abgetrennt wurden. Der organische Anteil im Sand ist daher relativ hoch (Tab. 5).

Tabelle 5: Durchschnittswerte der Sand- und Faserstoffabtrennung

	% TS	% OS	kg TS/t Grüngut	kg OS/t Grüngut
	Sandaustrag			
Phase I; Charge 2	31.2	33.0	30.2	10.0
Phase II; Charge 3	28.1	35.3	36.8	13.0
	Faserstoff-Austrag			
Phase I; Charge 2	27.8	39.7	33.6	13.2
Phase II; Charge 3	9.5	82.0	22.0	18.0
Total Phase I			63.8	
Phase II			58.8	

Der Sandaustrag war in Phase II rund 20% höher als in Phase I (Charge2). Das mag wohl mit der Saison in Zusammenhang gestanden haben. In beiden Fällen betrug der OS-Anteil am TS rund ein Drittel.

7.3.2 Faserstoffabscheidung

Rein mechanisch hat sich das Rotationssieb hervorragend bewährt. Allerdings war der Abscheidegrad im Vergleich zum statischen Sieb um einen Drittel geringer. Die Maschenweite war auch um den Faktor 2 weiter. Das hat gleichzeitig auch zu einer Reduktion des TS-Gehaltes geführt (Tabelle 5). Teilweise mag das auch damit zusammenhängen, dass der TS-Gehalt des frischen Grüngutes in Charge 3 deutlich tiefer lag, als in den Chargen 1 und 2 (Tab. 6). Der Fermentationsprozess blieb dabei unbeeinflusst. Die feineren Partikel haben den Anaerobfilter problemlos passiert oder haben sich am Fermenterboden abgesetzt.

Tabelle 6: TS- und OS-Gehalt vor und nach den Perkulationsdurchläufen

	Durchschnitt Charge 1		Durchschnitt Charge 2		Durchschnitt Charge 3	
	TS (%)	OS (%)	TS (%)	OS (%)	TS (%)	OS (%)
Frisch	41,7	59,9	42,0	58,7	38,5	68,9
Nach Perkolation	33,8	65,3	28,4	62,9	n.b.	n.b.

8 Massen- und Energiebilanzen

In Abbildung 7 ist die Massenbilanz für den optimierten Perkulationsbetrieb in Phase II dargestellt mit einer Wasserzufuhr von $6 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$, einer Belüftungsrate von $9 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$ und einer Kontaktzeit des Waschwassers mit dem Grüngut von 8 Minuten. 5 m^3 Perkulationswasser pro m^3 und Tag werden direkt rezykliert. Die HRT im Fermenter beträgt damit 4 Tage.

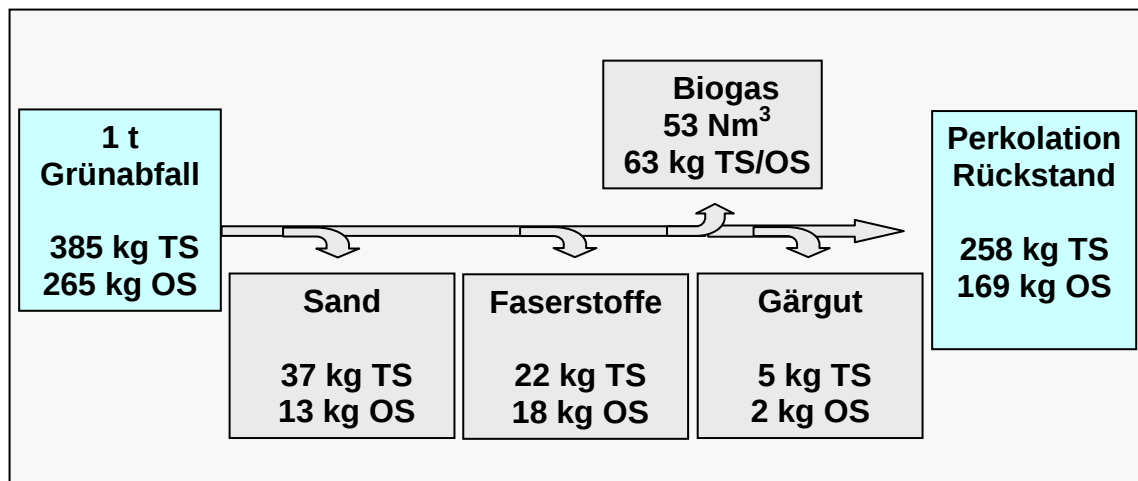


Abbildung 7: Massenbilanz für den Perkulationsdurchlauf mit optimierten Parametern

Durch die Wasserzufuhr in den Perkulator nahm das Grüngut Feuchtigkeit auf, was dazu führte, dass der TS-Gehalt nach der Perkolation niedriger war als vor der Behandlung. Rund ein Drittel der TS ist im Perkulationsverfahren entweder abgebaut oder abgetrennt worden. In einer Praxisanlage werden die Faserstoffe entweder in den Perkulator rezykliert oder zusammen mit dem Sand der Nachkompostierung zugeführt. In einer Anlage im technischen Massstab würde der Perkulationsrückstand vor der Nachkompostierung abgepresst auf einen TS-Gehalt von 45 bis 50%. Damit könnte auch der CSB-Austrag und letztlich die Gasproduktion noch leicht erhöht werden.

Unter der Annahme einer 2tägigen Perkolation und einer Vergärung mit einer HRT von 4 Tagen ist für eine 2'000 Tonnen pro Jahr Anlage eine **Energiebilanz** erstellt worden (Abb.8). Dabei wurde die höchste in der Pilotanlage erzielte Gasausbeute von 53 m^3 pro Tonne unterstellt.

Die Daten belegen, dass auch eine kleine Anlage mit wenig geeignetem Grüngut demnach mit einer Nettoenergieproduktion betrieben werden kann.

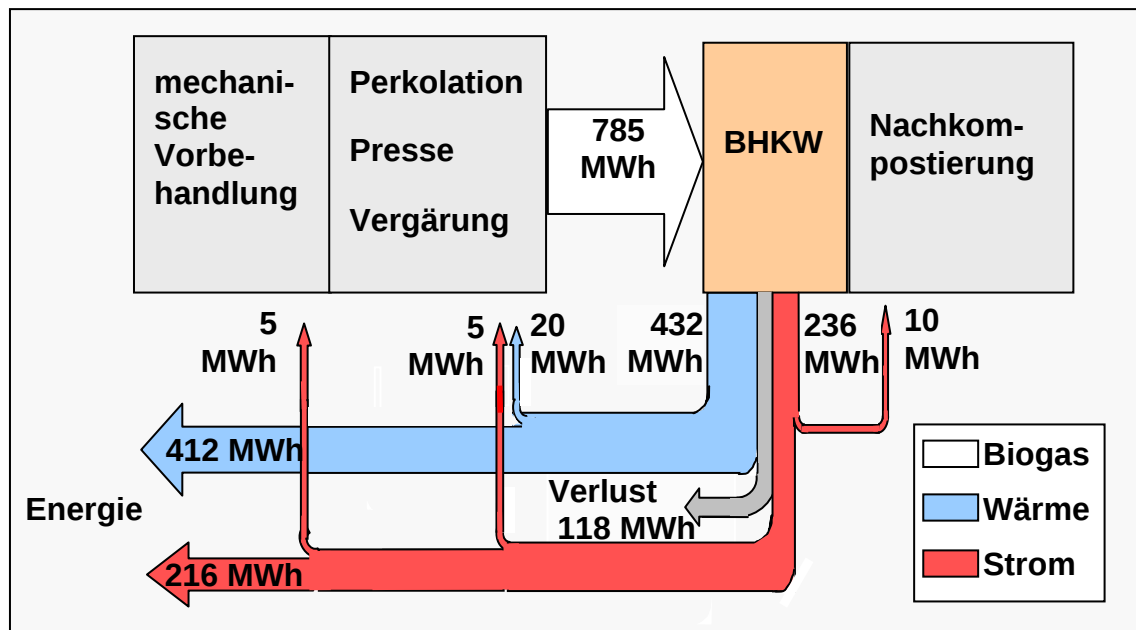


Abbildung 8: Jährliche Energiebilanz für den Perkulationsdurchlauf mit optimierten Parametern und einer Gasausbeute von $53 \text{ Nm}^3/\text{t}$ Grüngut und einem Anlageninput von 2000 Jahrestonnen.

9 Bestimmung des Kompost-Reifegrades

Um festzustellen, inwieweit die Perkolation einen Einfluss auf die Kompostqualität (Reifegrad) des Grünguts hat, wurden Rottetests [5] mit dem Grüngut vor und nach der Perkolation durchgeführt und miteinander verglichen. Für diesen Test wurde das Material von Charge 2 der Versuche verwendet, die mit den optimierten Perkulations-Parametern durchgeführt wurden. Das Frischmaterial wies einen TS-Gehalt von 44,5 % auf, das ausgelaugte Material nach der Perkolation hatte einen TS-Gehalt von 31.3%.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Rottegrad durch eine 2-tägige Perkolation von Stufe I auf Stufe IV gesunken ist und dadurch mit Frischkompost verglichen werden kann (siehe Abbildung 9 und 10).

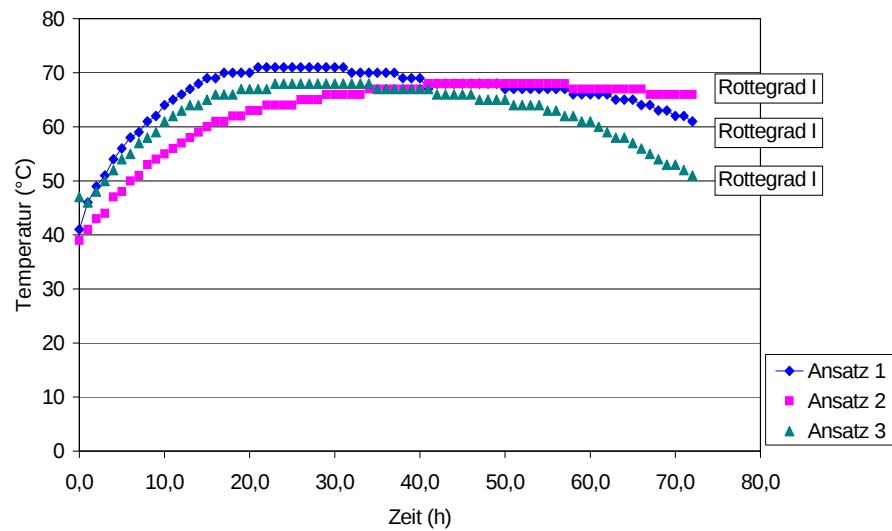


Abbildung 9: Bestimmung des Rottegrads von Grüngut vor der Perkolation

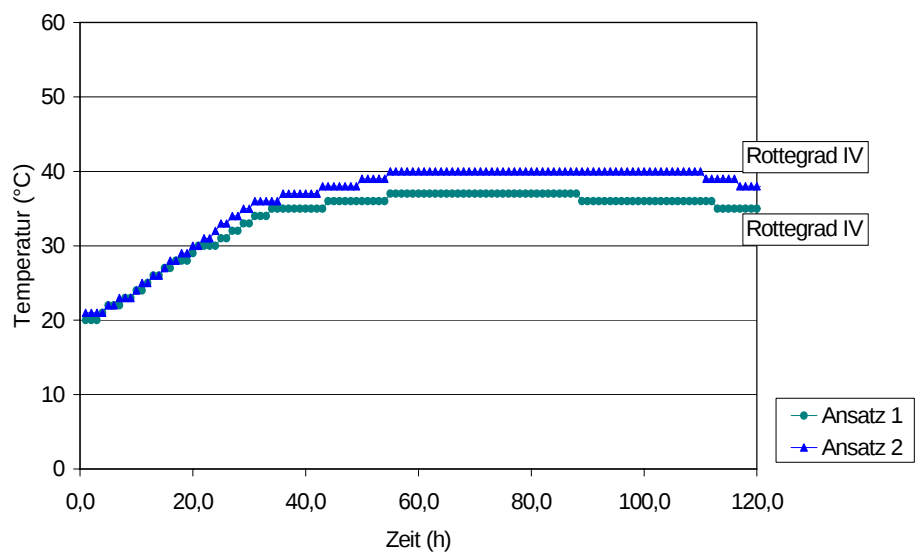


Abbildung 10: Bestimmung des Rottegrads von Grüngut nach der Perkolation

10 Investitionsabschätzung

Die Investitionshöhe einer, den Zielvorstellungen entsprechenden Anlage, von 2000 Jahrestonnen abzuschätzen war für den Hersteller (ISKA GmbH) nicht möglich, da die kleinsten Einheiten für den Restmüll für 25'000 Jahrestonnen ausgelegt werden. Bei einem Faktor 10 kleineren Anlagen müssten völlig neue Geräte evaluiert werden. Es konnte daher nur eine sehr grobe Abschätzung für eine Anlage von 5'000 Jahrestonnen gemacht werden, wobei bei einigen Komponenten – mangels Daten – willkürlich ein Kostenanteil von 50% der 25'000er Anlage angenommen wurde. Da auch die ganze Steuerung wie bei einer Grossanlage miteinbezogen wurde mit einer völligen Automatisierung des Ablaufes, sind die geschätzten Anlagenkosten wahrscheinlich etwas zu hoch.

Dem gegenübergestellt wird eine Hochrechnung der Pilotanlage mit 180 Jahrestonnen auf 5'000 Jahrestonnen. Da die Pilotanlage gegebener Massen einfach ausgelegt war, ist davon auszugehen, dass die errechneten Anlagenkosten zu tief sind (Tab.7).

Tab.7: Geschätzte Investitionskosten für eine 5000 Jahrestonnen Anlage

Position	Preise runtergerechnet [Fr.]	Preise hochgerechnet [Fr.]
Mechanische Vorbereitung	300'000	200'000
Summe Perkolation	2'000'000	850'000
Summe Gasverwertung/Abluftr.	380'000	250'000
Summe Lüftungsanlage allgem.	100'000	100'000
Summe Biofilter	250'000	250'000
Summe Elektro- & Steuertechnik	400'000	100'000
Summe Bau	650'000	350'000
Total	4'080'000	2'100'000

Nimmt man den Schnitt, so können wir von gut 3.5 Mio. Franken Invest ausgehen. Aber selbst die höhere Summe liegt immer noch im unteren Bereich der bekannten Vollvergärungen.

11 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass der Perkulationsprozess gut für die Behandlung von Grüngut geeignet ist. Durch die Optimierung der Waschwasserraten, der Belüftungsraten und der mechanischen Parameter konnte die Menge an ausgewaschenem CSB auf das Siebenfache erhöht werden.

Die besten Resultate wurden bei einer Auswaschrates von mindestens $6 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ und einer Belüftungsrate von $9 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{h}$ bei einer 8-minütigen Kontaktzeit des Grünguts mit dem Waschwasser erzielt.

Der Hybrid-Anaerobfermenter bewährte sich bei der Reinigung des beladenen Perkulationswassers: Bis zu 80% des CSB konnte zu Biogas umgesetzt werden. Dabei konnte ein Gasertrag bei 4 Tagen Aufenthaltszeit von $53 \text{ m}^3 / \text{t}$ erreicht werden.

Der direkte Vergleich der Perkolation von Grünabfällen mit der Vollvergärung im Batch-Ansatz zeigte, dass rund 75% der Gasausbeute erreicht werden können.

Der Vorteil einer Perkulationsanlage liegt in den kurzen Behandlungszeiten von insgesamt ca. 6 Tagen. Bei einer herkömmlichen Biogasanlage müsste bei diesem Substrat von einer Verweilzeit von 15-20 Tagen ausgegangen werden.

Die Energiebilanz zeigt, dass pro Tonne Grüngut netto 108 kWh Strom und 206 kWh Wärme gewonnen werden können, anstelle eines durchschnittlichen Energieverbrauchs von 31 kWh/ t auf einer herkömmlichen Kompostanlage [7]. Die Intensivrotte zur Produktion eines Frischkomposts kann von rund 3 Wochen auf 2-3 Tage reduziert werden. Eine Nachrüstung zur Behandlung von Grüngut in einer Perkulationsanlage kann einfach realisiert werden.

12 Abkürzungen

AS	Anorganische Trockensubstanz
d	Tage
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	Dissolved Organic Carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
HRT	Hydraulic Retention Time (hydraulische Verweilzeit)
Nm ³	Gasvolumen unter Standardbedingungen (0 °C, 1013 mbar)
n.b.	nicht bestimmt
OLR	Organic Loading Rate (Organische Raumbelastung)
OS	Organische Trockensubstanz
SNAP	Substrat nach Perkolation
TOC	Total Organic Carbon (Gesamter organischer Kohlenstoff)
TS	Trockensubstanz

13 Literatur

- [1] Gosh S. and Klass D. L. ***Two-phases anaerobic digestion***. Process Biochem. 13, 15-24, 1987.
- [2] A. Wellinger, C. Widmer, P. Schalk: ***Percolation - A New Process to Treat MSW***. II International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste, Barcelona, Seiten 315-322, 1999.
- [3] A. Wellinger, C. Widmer: ***Vergärung von Restabfall***. 10. Kassler Abfallforum, 1998.
- [4] P. Schalk, V. Steinberg: ***Reststoffminimierende Abfallbehandlung***. Sonderdruck aus dem AbfallwirtschaftsJournal Juni 1998.
- [5] Bundesgütergemeinschaft Kompost e. V.: ***Methodenbuch zur Analyse von Kompost*** (1994), Verlag Abfall Now e. V., Stuttgart
- [6] ISKA GmbH: ***ISKA - Intelligente Lösungen für die kommunale Restmüllentsorgung***. U-Plus, D-76275 Ettlingen, 2001.
- [7] Baudirektion Kanton Zürich, AWEL: Kompostier- und Vergärungsanlagen im Kanton Zürich. Jahresbericht 2001

14 Anhänge

Anhang A. Durchschnittliches CSB : TS und CSB : OS - Verhältnis von Perkulationswasser und Fermenterablauf

	Perkulationswasser		Fermenterablauf	
	CSB : TS	CSB : OS	CSB : TS	CSB : OS
Charge I	0,76	1,63	0,43	1,39
Charge II	0,74	1,60	0,51	1,13

Anhang B**Zusammengefasste Resultate der Phase II**

Waschwasser: 740 l/h bzw. 6 m³/m³*d;
Belüftung 9m³/h

	CSB- Austrag [kgCSB/t*d]		Summe	Abb au CSB %	% OS	HRT d	LR [kg/m ³ *d]		Gasausbeute		I CH ₄ /kg CSB abg	% CH ₄	Batch m ³ /t
	Tag 1	Tag 2					Tag 1	Tag 2	l/kg CSB	m ³ /t			
Versuch 2.1	277	62	339	80.4	62.8	4	2.65	1.21	110	53	146.8	74.1	69
Versuch 2.2	184	82	266	73.1	n.b.	4	2.86	2.43	71	50	80.5	71.4	33
Versuch 2.3	168	115	283	75.5	74.5	3	3.13	3.67	103	29	87.8	71.4	31
Versuch 2.4	186	152	338	70.7	n.b.	3	3.55	4.01	145	48	190.4	71.4	
Versuch 2.5	152	53	205	56.9	59.4	2	4.47	3.26	90	19	216.7	70.9	
Versuch 2.6	117	128	245	48.5	44.1	2	5.62	4.47	123	30	386.5	71.4	49
Versuch 2.7	157	71	228	50.8	61.6	1.5	4.21	5.28	152	33	528.7	70.9	
Durchschnitt	177	95	272	65	60				113	34	234		46
Max	1101	902	338	80.4					152	53	528.7		69
Min	184	62	205	48.5					71	19	80.5		31