

8 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, über die Substratbeschreibung aus physikalischer Sicht sowie die Abhängigkeit der Gasbildung bei unterschiedlicher Ausformung des Festbettes, Erkenntnisse zum Festbettverhalten der batchbetriebenen Feststoffvergärung zu generieren. Es galt, die Parameter zu bestimmen, zu eruieren und einzugrenzen, welche das Festbett mit Blick auf die Durchströmbarkeit charakterisieren. Entscheidend sind zudem Betrachtungen zum anaeroben Abbau vor dem Hintergrund der räumlichen Belastung.

Bei der Methangärung von nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo), landwirtschaftlichen Abprodukten sowie organischen Abfällen wird vorausgesetzt, dass die Milieubedingungen (Wassergehalt, Nährstoffe, Temperatur, hemmungsfreie Umgebung) für das komplexe Zusammenleben der anaeroben Mikroorganismen konstant im Optimum gehalten werden können. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Mediums (Flüssigphase oder Festbett) übernehmen hier die Aufgabe, anvisierte Bedingungen aufrechtzuerhalten. Aufgrund fehlender Aggregate zur Homogenisierung während der diskontinuierlichen Vergärung in Festbetten, dient häufig die Beaufschlagung mit Prozessflüssigkeit (Perkolat) als dynamisches Element. Als physikalisch kritisch ist demnach eine ungleich verteilte Durchströmung der Packung anzusehen. Um Eigenschaften eines Materials beurteilen und Überlegungen zu dessen Verhalten im Festbett anstellen zu können, müssen sie zunächst bekannt sein; oder sie müssen erhoben werden.

Auf Basis der theoretischen Kenntnisse zur Charakterisierung disperser Systeme sowie zur Durchströmung poröser Medien wurden als Zielparame-ter Wasser- und Trockensubstanzgehalt, Wasserkapazität, Schüttdichte, Verdichtungsverhalten, Korndichte, Korngrößenverteilung sowie die hydraulische Leitfähigkeit in Form des Durchlässigkeitsbeiwertes abgeleitet. Die Materialcharakterisierung von insgesamt acht Substraten - Apfeltrester, Anwelk-/Grassilage, Grasschnitt, Maissilage, Rübenschnitzel, Topinambur, Triticale sowie Rinderfestmist als stellvertretendes Impfmateri- - vollzog sich im Sinne einer Ansprache. Die Substrat- auswahl orientierte sich an der generellen Verfügbarkeit, der Möglichkeit zur Betriebs-sicherung durch Ausgleich bei Substratmangel sowie geringeren Markt- preisschwankungen im Vergleich zu den klassischen Silagen. Es wurden sowohl die in der Bodenphysik anerkannten Bestimmungsmethoden als auch die gewon- nenen Eigenschaften und - mit Blick auf die Durchströmbarkeit - deren Verzah- nung in der Haufwerkspackung, diskutiert und hinsichtlich der Aussagekraft in den Kontext der Literaturerfahrungen gestellt.

Es konnte gezeigt werden, dass sich für die untersuchten Schüttdichtepackungen Wasserkapazitäten auf annähernd gleichem Niveau einstellen, welches im Mittel bei 78,5 Gew.-% bezogen auf die Feuchtsbstanz liegt ($\pm 8,5\%$). Im Praxisbe- trieb steht dies bei spezifisch hoher Wasseraufnahme gleichbedeutend mit dem Ausschleusen größerer Perkolatanteile, die zu einem Mangel an Prozessflüssig- keit führen können. Die Korndichten, als essentielle Größe bzgl. des Porenrau- mes, bewegen sich im Bereich von $0,83\text{ g/cm}^3$ für Stroh bis $1,47\text{ g/cm}^3$ für

Rübenschneitzel. Sie liegen damit unterhalb derer von Torf, welches eines der wenigen, bisher charakterisierten organischen Materialien darstellt. Die Werte bilden erstmalig Größen für NawaRo ab. Für nicht halmgutartige Substrate mit $\rho_s > 1,30 \text{ g/cm}^3$ ist eine Abschätzung der Korndichte über die einfache Bestimmung der organischen Trockensubstanz (oTS) möglich. Hier ist zukünftig zu klären, inwiefern die Beziehung über einen Formfaktor erweiterbar ist. Es konnten generell Porenvolumina $> 90 \%$ festgestellt werden, wobei der wassergefüllte Teil zwischen ein und 88 % schwankt. Die Durchlässigkeit für Flüssigkeiten ist auf Basis der Ergebnisse überwiegend als gegeben einzuschätzen. Der Abgleich mit den Durchlässigkeitsbeiwerten zeigt jedoch, dass die Bestimmung der Porenanteile allein, keine Aussage zu deren Konnektivität zulässt. Hier sind noch Schritte zur Erfassung des effektiven Porenraums zu leisten. Diesbezügliche Möglichkeiten wurden an diskutiert. Die geschütteten Substrathaufwerke weisen hydraulische Leitfähigkeiten in der Größenordnung von 10^{-6} bis 10^{-4} m/s (mit $i = 6,75$) auf. Über die Betrachtung zu erwartender Auflasten wurden veränderte Bedingungen abgeleitet, wodurch sich bei Erhöhung des Gradienten ($i = 30$) in Kombination mit einer Vorverdichtung Durchlässigkeiten von 10^{-8} bis 10^{-5} m/s ergaben. Die Substrate sind mehrheitlich als schwach durchlässig einzustufen. Bei akkuratem Einbau in den Fermenter ist somit von Schwierigkeiten bei der Durchströmung auszugehen.

Über Kornverteilungskurven wurde im Vorfeld durch die Ermittlung von Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl sowie des wirksamen Korndurchmessers versucht, auf die Durchlässigkeit der Packungen zu schlussfolgern. Die Modellansätze erwiesen sich jedoch als inkompatibel, so dass von einem Heranziehen der Siebanalyse zur Charakterisierung vorerst abgeraten wird. Auch explizite Ansätze bodenmechanischer Zusammenhänge hinsichtlich Kornverteilung und Verdichtbarkeit greifen für die untersuchten NawaRo nicht. Als Ursache kann das zugrundeliegende Konzept der Kugelpackung angesehen werden, welche nicht vorliegt. Hier wäre zu prüfen, ob die Bestimmung der spezifischen Oberflächen oder die Anpassung der Formfaktoren realitätsnahe Ergebnisse erzeugen können. Weiterhin müsste das Quellvermögen organischer Materialien integriert werden. Andernfalls bringt eine Optimierung der Lagerung über die Veränderung einzelner Kornfraktionen keine Zugewinne.

In Summe sind die gewonnenen Ergebnisse als Basis für eine Standardisierung bei der technischen Nutzung von Biomasse in Festbetten zu verstehen. Es wurde erstmalig versucht, die Eigenschaften nachwachsender Rohstoffe anhand bodenphysikalischer Methoden zu erfassen und Erkenntniszugewinne für den Betrieb batchbetriebener Feststoffvergärungsanlagen zu generieren. Dies ist im Grundsatz gelungen, wodurch das Fundament gelegt wird, die Charakterisierung als Teil anerkannter Methoden zur Beurteilung von Prozessverläufen etablieren zu können.

Begründet im Mangel an einer klaren, in der Fachwelt allgemein anerkannten und abgesicherten Definition des Begriffs "Feststoffvergärung", fand auf Basis von Literaturangaben sowie nach eigenen Recherchen, eine Eingrenzung der

Verfahren auf Garagenfermenter statt. Die Beurteilung der Auswirkungen unterschiedlicher Festbettzustände auf den Gasertrag vollzog sich über halbtechnische Versuche. Diese erfolgten ohne die maskierenden Einflüsse einer Perkolation. Anwendungsorientiert wurden Substratmischungen mit Gärresten aus dem vorangegangenen Versuch in 120 l (5 Substrate) bzw. 18 l Reaktoren (2 Substrate) vergoren. Festbettunterschiede, in engem Zusammenhang mit der Charakterisierung zu sehen, wurden durch standardisiertes Verdichtungsgerät in Form von Schüttdichte, mittlerer Verdichtung und Maximaldichte erreicht. Dem breiten Substratspektrum Rechnung tragend, wurde eine Verweilzeit von 60 Tagen angesetzt. In Summe konnten 60 Versuchsansätze über einen Zeitraum von zwei Jahren realisiert werden. Durch Vorversuche ergab sich ein geeignetes Mischungsverhältnis mit Impfmateriale von $0,65 \text{ TS}_{\text{Substrat}}$ zu $\text{TS}_{\text{Impfmateriale}}$. Dieses wurde der Vergleichbarkeit halber über alle Substrate beibehalten. Aufgrund unterschiedlicher Freisetzungsgeschwindigkeiten, kam es in einigen Prozessen dennoch zu einem verzögerten Abbau. Dies betraf insbesondere die strukturschwachen, wasserhaltigen Substrate.

Da es allerdings um qualitative Aussagen zur Dichteabhängigkeit des Haufwerks ging, ist die exakte Bestimmung substratspezifischer Gaserträge nachrangig. Mit der gewählten Herangehensweise war es möglich, Unterschiede zwischen gehemmten und ungehemmten Prozessen zu erfassen. Die Bewertung der Gaserträge erfolgte anhand der Gasbildungskurven sowie der Prozesswasseranalyse. Es zeigte sich, dass langsam hydrolysierbare bzw. strukturstarke Substrate wie Stroh mit bis zu 500 l/kg oTS höhere Gaserträge erreichen können als in nassfermentativen Ansätzen. Dies wird als prozesstechnischer Vorteil des Substrataufschlusses gewertet und trifft auch auf Triticale zu. Es bleibt zu vermerken, dass ausge dehnte Verweilzeiten zugrunde liegen. Die für einen effizienten Betrieb benötigte kürzere Aufenthaltszeit, kann für nicht rezirkuliertes Material nur über die Verknüpfung aus Impfmateriale und Perkolation sowie optimierter Einfahrphase erreicht werden. Hierfür ist die flächige Durchdringung mit Prozessflüssigkeit unumgänglich. Obschon Rübenschnitzel durch den hohen Zucker- und Wassergehalt ein schnell verfügbares Substrat abgeben, sind sie als Monosubstrat für die Festbettfermentation ungeeignet. Stark aufgeschäumte Packungen und hohe Entwässerungsquoten (ca. 50 Gew.-% des Inputs) belegen den eigentlich stabilen anaeroben Abbau mit technischen Unsicherheiten. Die festen Gärreste besaßen stets stapelfähige Konsistenz.

Entgegen der angenommenen Arbeitshypothese üben variierende physikalische Randbedingungen des Festbettes in Form unterschiedlicher Einbaudichten keinen Einfluss auf die Gasentwicklung in Prozessen ohne Perkolation aus; unabhängig davon, ob diese gehemmt oder ungehemmt vorliegen. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass ohne Perkolation der Fermenter unter maximaler Verdichtung des Substrates befüllt werden kann. Hier muss in Abhängigkeit vom Impfmaterialeanteil geprüft werden, in welchem Verhältnis ungehemmte Gaserträge zu locker geschüttetem Material mit Perkolatbeaufschlagung stehen. Hinsichtlich der Haufwerkssetzungen traten für die unterschiedlichen Einbaudichten

hohe Differenzen auf. Es zeigte sich aber, dass sich daraus resultierende Volumina auf Höhe der Maximalverdichtung im Ausgangszustand angleichen. Zum Ausbaupunkt war bezüglich dieser Basis eine maximale Setzung von 12 Vol.-% für Stroh auszumachen. Strukturschwache Substrate wie Grasschnitt und Topinamburkraut, aber auch gehäckselter Triticale, verzeichnen anteilig sogar eine leichte Volumenzunahme (max. 4 %). Die Gärreste wiesen im Mittel über alle Versuche einen Wassergehalt von 84,2 % FS (± 1 %) auf. Das Ergebnis bietet in Verbindung mit der Bestimmung der mittleren Lagerung der Substratmischung sowie den Erkenntnissen zur Wasserkapazität die Möglichkeit, Menge und Charakter des Gärrestes und damit des für die Folgebefüllung zur Verfügung stehenden Impfmateri als abzuschätzen. Darin wird ein hoher Zugewinn für die betriebliche Praxis gesehen.

Für das Erreichen genereller praktischer Handlungsanweisungen, die eine Durchströmung des Festbettes diskontinuierlicher Feststoffvergärungsanlagen sicherstellen, ist noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten. Es wurden verschiedene Untersuchungen vorgeschlagen sowie Ansätze zur Präzisierung und Optimierung aufgezeigt.