

# Abschlussbericht

## **Untersuchungen zum kontinuierlichen Betrieb der Graspapierproduktion aus Gras/Heu mit Reststoffnutzung sowie Anpassung der Abwasserreinigung unter Berücksichtigung bioökonomischer Gesichtspunkte**

von

Ursula Schließmann, Brigitte Kempter-Regel, Wolfgang Krischke  
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB)

Matthias Franz

Hochschule der Medien

Förderkennzeichen: L7518018  
Laufzeit: 01.11.2018 - 31.01.2020

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln  
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Januar 2020



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung des Projekts</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete</b> .....	<b>5</b>
3.1	Fraktionierung von Heu und seiner Inhaltsstoffe .....	5
3.1.1	Laboruntersuchungen zur Fraktionierung .....	5
3.1.2	Bereitstellung von Fasern für die Laborpapierherstellung .....	13
3.1.3	Ergebnisse aus der Labor-Papierherstellung .....	15
3.2	Analytik der Inhaltsstoffe des fraktionierten Heus .....	16
3.2.1	Analytik des Heus und der wässrigen Phase nach Aufschlämmung im Labor .....	16
3.2.2	Heupellet-Versuche im Pilotmaßstab .....	17
3.3	Untersuchungen zur Verwertungsmöglichkeit der abgetrennten organischen Inhaltsstoffe .....	21
3.3.1	Literaturrecherche zur Ermittlung der Verwertungsmöglichkeiten der Nichtfaserfraktion .....	21
3.3.2	Labor-Versuche zur Biogasproduktion mit der Organik-Fraktion .....	22
3.3.3	Aerober Abbau des Waschwassers .....	24
3.3.4	Konzepterstellung für mögliche Verwertungswege der abgetrennten Wertstoffe ...	25
3.4	Prozessangepasste Abwasserreinigung: Erarbeitung der Grundlagen für einen genehmigungsfähigen Prozess. Untersuchung des Einflusses der Graspapierproduktion auf die Abwasserreinigung .....	26
3.4.1	Auswertung des Betriebstagebuchs .....	26
3.4.1.1	Hydraulische Belastung und Einfluss der Graspapierproduktion .....	27
3.4.1.2	CSB-Konzentration und Einfluss der Graspapierproduktion .....	29
3.4.1.3	CSB-Fracht im Zulauf und Einfluss der Graspapierproduktion .....	30
3.4.1.4	Spezifisches Abwasseraufkommen und Einfluss der Graspapierproduktion .....	32
3.4.1.5	Spezifische CSB-Fracht und Einfluss der Graspapierproduktion .....	32
3.4.2	Probenahme während der Graspapierproduktion .....	33
3.4.2.1	Beschreibung der Abwasserreinigung .....	33
3.4.2.2	Festlegung der Probenahmestellen und Probenahmen .....	34
3.4.2.3	Ergebnisse der Beprobung der Abwasserreinigung während der Graspapierproduktion Charge A .....	36
3.4.2.4	Ergebnisse der Beprobung der Abwasserreinigung während der Graspapierproduktion Charge B .....	43
3.5	Entwicklung eines Konzepts zur zukünftigen Abwasserreinigung .....	44
3.6	Ermittlung von Maßnahmen im Bereich Energieeffizienz .....	45
3.7	Einfluss der Heubehandlung auf die verarbeitungstechnischen Eigenschaften und die damit verbundenen Anforderungen an den Werkstoff .....	46
3.7.1	Durchführung des Laborversuchs .....	46
3.7.2	Flächengewicht und Dicke .....	48
3.7.3	Feuchtigkeitsbestimmung .....	49
3.7.4	Zugfestigkeit .....	50
3.7.5	2 Punkt-Biegesteifigkeit .....	51

3.7.6	Bedruckbarkeit und Scheuerfestigkeit .....	52
3.7.7	Cobb-Test .....	55
3.7.8	Robinson-Test .....	56
3.7.9	Rilltest .....	57
3.7.10	Glätte nach Bekk .....	58
3.7.11	Oberflächenspannung .....	59
3.8	Ausblick.....	60

# 1

## Einleitung und Zielsetzung des Projekts

Die Papierindustrie ist aktuell vielfältigen Herausforderungen ausgesetzt. Zum einen nimmt der Papierbedarf weltweit zu, gleichzeitig ist hierzulande ein Umbruch in der Nachfrage für die einzelnen Papiersorten zu verzeichnen. Außerdem steigt das Bewusstsein für nachhaltige Produktion gerade für Industriezweige wie die Papierindustrie, die einen hohen Ressourceneinsatz erfordern, stetig an. Zum Klimaschutz, Umweltschutz oder auch zur Biodiversität trägt die herkömmliche Papierindustrie bisher allerdings aufgrund des hohen Bedarfs an Hölzern, der Monokulturen und langer Transportwege für den importierten Zellstoff eher wenig bei.

Für die Herstellung von Papier und papierbasierten Produkten werden vorrangig Primär- und Sekundärfaserstoffe aus Holz (zu 95%) eingesetzt. Grundsätzlich können alle Cellulose-haltigen Rohstoffe zur Papierherstellung verwendet werden, allerdings haben sich alternative Rohstoffe zum Holz/Zellstoff in Deutschland bzw. Mitteleuropa nicht durchgesetzt, ein großer Teil des für die Papierherstellung benötigten Zellstoffs wird importiert.

Die Herstellung von Zellstoff ist sehr aufwändig hinsichtlich des Rohstoff-, Energie- und hohen Wasserbedarfs (12 m<sup>3</sup>/t Zellstoff), das am Ende des Prozesses als Abwasser anfällt und gereinigt werden muss. Zudem müssen die Reststoffe bei der Zellstoffherstellung, Chemikalien und Holzinhaltsstoffe wie Lignin, behandelt oder zurückgeführt werden bzw. das Lignin wird verbrannt und energetisch genutzt.

Die Primärfaserstoffe stammen je nach Verfügbarkeit und Qualitätsanforderungen aus unterschiedlichen Hölzern und sonstigen Pflanzenfasern, in Deutschland vorwiegend aus Abfall- und Resthölzern. Im Gegensatz zu den Primärfaserstoffen stammen Sekundärfaserstoffe aus Recyclingmaterial wie Altpapier. Allerdings wird der Bedarf an hochwertigem Altpapier zukünftig voraussichtlich nicht abzudecken sein. Der Bedarf an zuzusetzenden Frischfasern wird infolgedessen ansteigen müssen.

In einem neuartigen nachhaltigen Ansatz zur Herstellung von Papierwaren, z. B. Verpackungsmaterialien, werden Faserstoffe aus Gras bzw. Heu als Ersatz für einen Großteil des Zellstoffs eingesetzt. Die Zahl der Raufutterfresser nimmt seit Jahren stetig ab. Deshalb werden weitere Verwendungen für den Grünschnitt gesucht, wobei die stoffliche Verwertung im Gegensatz zur energetischen Verwertung bevorzugt werden sollte. Gras bzw. Heu hat den Vorteil, dass es lokal zur Verfügung steht bzw. auf heimischen Wiesen lokal produziert werden kann. Dabei wird gleichzeitig auch Aspekten wie z. B. des Umweltschutzes, der Artenvielfalt und Biodiversität, des Insekten- und Bienenschutzes, Rechnung getragen, da für die Gewinnung der Faserstoffe die Gräser erst in einer späten Wachstumsphase „geerntet“ werden müssen. Lange Transportwege entfallen, so kann ein Großteil an Energieeinsatz bzw. auch CO<sub>2</sub>-Ausstoß beim Transport vermieden werden. Außerdem könnte zukünftig der Anbau bzw. auch der Rohstoffeinsatz von hochwertigem Holz reduziert werden, und dieses kann z. B. für andere, hochwertigere Produkte zur Verfügung stehen.

Gras und Heu auf heimischen Flächen fällt z. T. schon aktuell als Landschaftspflegematerial an, das bisher noch keiner ökonomischen Verwertung zugeführt wird. Auf diese Weise können auch Kreisläufe geschlossen werden, indem Naturstoffe, die bisher als Reststoffe anfallen, nun einer Nutzung in Form einer stofflichen Verwertung (eine energetische ist aufgrund des geringen Energiegehalts nicht wirtschaftlich) zugeführt werden. Dadurch ergeben sich auch ökonomische Vorteile. Andererseits kann es auch bedarfsorientiert produziert werden, so dass die für die Papierproduktion erforderlichen Qualitäten und Quantitäten zur Verfügung stehen. So kann ein Rohstoff, der prinzipiell in unmittelbarer Nähe der Papierfabrik vorhanden ist, bzw. unter ökologischen Gesichtspunkten produziert werden kann, gewonnen und verwertet werden. Ökologische Vorteile zeigen sich auch darin, dass die

Graspapierproduktion sowohl hinsichtlich des Wasserbedarfs, der eingesetzten Prozesschemikalien als auch hinsichtlich des Energieverbrauchs nur 50 % pro Tonne Papier benötigt im Vergleich zur Produktion von herkömmlichem Papier auf Basis von Frischfaserzellstoff (Information Papierfabrik). Das weltweite Marktpotential für Graspapier (Zielmarkt Konsumgüter und Lebensmittel) und dessen Technologien liegt derzeit, allein für den Verpackungsbereich, bei mehr als 14 Mio. Tonnen pro Jahr. Bis zum Jahr 2022 erscheint ein Graspapier-Marktanteil in Höhe von ca. 15% (adressierbarer Markt) als sehr realistisch (Quelle: RISI World Containerboard 5-Year Forecast, eigene Einschätzungen; Papierfabrik).

Erste Produktionschargen auf Basis von Heu und Gras wurden versuchsweise hergestellt und es wurde damit prinzipiell gezeigt, dass Papier auf Grasbasis erzeugt werden kann. Der Einsatz von Zellstofffasern kann deutlich reduziert werden. Die Qualitäten sind sehr zufriedenstellend. Es entspricht den Anforderungen der Verbraucher, so dass die Nachfrage für Papier auf Gras- und Heubasis gegeben ist.

Für die Graspapierproduktion wurden bisher Pellets verwendet, die auf Basis der gesamten oberirdischen Graspflanze (Grasschnitt) hergestellt wurden, also nicht nur aus den Faseranteilen. Durch die Nicht-Faser-Anteile in den Pellets traten im Papierproduktionsprozess nach aktueller Vorgehensweise Störungen auf, die eine kontinuierliche, stabile und langanhaltende Papierproduktion verhindern. Auf einer herkömmlichen Papiermaschine ohne Rohstoffvorbereitung kann Graspapier nicht kontinuierlich produziert werden, da bereits nach mehreren Stunden aufwändig gereinigt werden muss, was mit hohem Personaleinsatz und Wasserverbrauch verbunden ist. Darüber hinaus kommt es dadurch zu erheblichem, zusätzlichem Aufwand in der Abwasserbehandlungsanlage einer Papierfabrik. Außerdem besteht die Gefahr, dass Einleitbedingungen nicht erfüllt werden können. Die Produktion kann bisher in einem stabilen Prozess noch nicht dauerhaft über z. B. eine Arbeitswoche betrieben werden, was aber für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens unbedingte Voraussetzung wäre. Durch die Verwendung von Gras für die Papierproduktion stellt sich eine neue Situation für die Abwasserreinigung dar. Die bisher stark kohlenstofflastige, stickstoffarme Fracht im Abwasser wird sich bei der Produktion von Papier auf Grasbasis dahingehend verändern, dass der Stickstoffgehalt zunehmen wird. Bisher in der biologischen Stufe der Abwasserreinigung auftretende Stickstofflimitierungen, die z. T. durch Zudosierung von Stickstoffquellen für ein ausgewogenes Nährstoffverhältnis vermieden wurden, werden zukünftig evtl. nicht mehr auftreten, eine Supplementierung mit Stickstoff ist möglicherweise dann nicht mehr notwendig. Der Einsatz von Gras wird sich also auch auf die Abwasserreinigung der herkömmlichen, bisher ausschließlich auf Zellstoffbasis ausgelegte weiße Papierproduktion auswirken. Aktuell beträgt der Grasanteil bei der im Projekt untersuchten Graspapierproduktion 40 %. Eine Steigerung des Grasanteils im Papier wäre wünschenswert. Die Abtrennung der Nicht-Faser-Fraktion ist einerseits gewünscht, um die Störungen auf der Papiermaschine zu vermeiden und die Belastung in der Abwasserreinigung soweit als möglich zu reduzieren. Andererseits sollte der Grad der Abtrennung nur soweit erfolgen, dass zum einen der Aufwand für die Abtrennung noch wirtschaftlich vertretbar ist und zum anderen aber auch die charakteristischen Eigenschaften, wie z. B. die Haptik oder die Optik des Papiers erhalten bleiben. Die Belastung in der Abwasserreinigung wird sich durch die Abtrennung voraussichtlich hinsichtlich der C- und N-Fracht verändern, und nicht komplett vermieden werden können. Insofern wird es notwendig sein, die Abwasserreinigung nach Abtrennung der Nicht-Faser-Bestandteile zu analysieren.

Im vorliegenden Projekt sollten die Grundlagen erarbeitet werden, um den Herstellungsprozess von grashaltigem Papier verfahrenstechnisch zuverlässig zu machen. Dies wird möglich durch die Abtrennung der Nicht-Faser-Bestandteile des Rohstoffs Heu vor dem Einsatz auf der Papiermaschine. Gleichzeitig sollte eine wirtschaftliche Verwertungsmöglichkeit für die abgetrennten Nicht-Faser-Anteile aufgezeigt werden. Die verfügbaren Mengen an Grasschnitt ist hoch. Allein in Rheinland-Pfalz gab es 2014 ein Potential von 62 000 t Heu, das nicht mehr für die Fütterung genutzt wurde.

Die Abtrennung der Nicht-Faser-Bestandteile sollte außerdem hinsichtlich des Einflusses auf die Abwasserreinigung untersucht werden. Dazu wurde der aktuelle Prozess mit dem zukünftigen, neuen Prozess mit fraktioniertem Grasrohstoff hinsichtlich der Auswirkung auf die Abwasserreinigung analysiert und verglichen. Die Grundlagen für einen genehmigungsfähigen Prozess sollten erarbeitet werden.

## 2 Zusammenfassung

Bei der Herstellung des nachhaltigen Werkstoffes „Graspapier“ aus Wiesenheu-Pellets hat sich gezeigt, dass bei der Verarbeitung des Heus auf der Papiermaschine leicht freisetzbare Bestandteile übermäßiges Wachstum von Mikroorganismen und Verklumpungen verursachen, was rasch zu Betriebsstörungen an der Maschine führt.

Im vorliegenden Projekt wurde die Abtrennung der störenden kleinmolekularen und löslichen Bestandteile aus dem Heu und deren Weiterverwendung untersucht. Die dabei erzielten Ergebnisse gelten ausschließlich für Heu und sind nicht auf andere Pflanzenrohstoffe, die für die Papierproduktion in Betracht kommen, übertragbar.

Zur Abtrennung der Störstoffe, wie beispielsweise lösliche Bestandteile wie Proteine, Salze und Monomere von Kohlenhydraten von den Grasfasern wurde eine wässrige Extraktion unter unterschiedlichen Verfahrens-Bedingungen getestet. Die Heupellets wurden in Wasser aufgeschlämmt und extrahiert, wobei der pH-Wert, die Temperatur und die Dauer beim Extrahieren variiert wurden. Durch die Extraktion konnten etwa 12 % der organischen Trockenmasse als lösliche Fraktion abgetrennt werden, die Variation der Bedingungen wirkte sich nur in geringer Weise auf den Erfolg des Extraktionsprozesses aus. Eine deutliche Steigerung abgetrennter Bestandteile ergab sich durch eine 3-fach Extraktion. Der Extraktionsprozess kann mit dem üblichen Instrumentarium der Papierherstellung (Filter, Pressen, Refiner) durchgeführt werden, wie Versuche mit Heupellets im Technikumsmaßstab zeigten.

An der Hochschule der Medien (Stuttgart) wurde die Eignung der gewaschenen Heufasern für die Papierherstellung untersucht. Hierzu wurde aus dem Heumaterial eine Faserfraktion im Bereich von etwa 2 -4 mm durch Mahlen und Sieben hergestellt und mit dem untersuchten Extraktionsverfahren behandelt. Die mechanischen Werte des daraus hergestellten Papiers waren besser als bei der unbehandelten Vergleichscharge.

Die abgetrennte wässrige Suspension enthält unter anderem Kohlenhydrate und Eiweiße, allerdings in so niedrigen Konzentrationen, dass eine Gewinnung einzelner Inhaltsstoffe oder eine stoffliche Nutzung des gesamten Extraktes nicht wirtschaftlich erscheint. Es wurde deshalb die Nutzung der abgetrennten Fraktion zur Biogasgewinnung und die Abbaubarkeit in einer aeroben Abwasserbehandlung im Labormaßstab untersucht.

Es zeigte sich, dass die Fraktionen „Feine Faserfraktion“ und „grobe Faserfraktion“, die nicht für die Papierproduktion eingesetzt wurden, zu Biogas umgesetzt werden können. Für die beiden Fraktionen wurden in den vorliegenden Untersuchungen eine Biogasausbeute von 0,3 NL/g  $\text{oTR}_{\text{input}}$  für die feine Faserfraktion und für die grobe Faserfraktion eine Biogasausbeute von 0,4 NL/g  $\text{oTR}_{\text{input}}$  ermittelt. In den vorliegenden Untersuchungen wurde ebenfalls nachgewiesen, dass das Waschwasser, das beim

Waschen der Faserfraktion, die für die Papierherstellung verwendet wurde, unter aeroben Bedingungen abbaubar war.

---

Zusammenfassung

---

Die Untersuchung der Abwasserreinigung ergab, dass die Graspapierproduktion höhere Abwasserdurchsätze sowie auch deutlich höhere spezifische CSB-Frachten im Zulauf verursachte. Im Falle einer chargenweisen Produktion treten der höhere Abwasseranfall sowie die erhöhte CSB-Fracht lediglich vorübergehend auf. Am Beispiel einer realen Kläranlage eines Papiererzeugers zeigte sich, dass die CSB-Konzentrationen im Ablauf immer unter 40 mg/l lagen. Auch die Sauerstoffversorgung in den Belebungsbecken war mit meist 4 bis 5 mg/l im Überschuss gewährleistet.

## 3.1 Fraktionierung von Heu und seiner Inhaltsstoffe

### 3.1.1 Laboruntersuchungen zur Fraktionierung

Das für die Papierherstellung zum Einsatz kommende Heu wird von speziellen Herstellern/Lieferanten in Form von Heupellets den Weiterverarbeitern zur Verfügung gestellt. Zur Herstellung der Pellets wird das getrocknete Rohmaterial Heu über eine Matrizenpresse ohne weitere Zusatzstoffe in Form von Pellets gepresst, die durch Verarbeitung und Dimension eine gewisse Standardisierung bezüglich Faserlänge und Trockenheit aufweisen. Die Pellets wurden seither schon in der Tierernährung eingesetzt, z. B. als Pferdefutter, und werden nun auch als nachhaltig und umweltverträglich erzeugtes Basismaterial für die Papierherstellung untersucht und verwendet, um dort einen Teil des Zellstoffs z. B. für die Herstellung von Verpackungsmaterialien, zu ersetzen. Da die Pellets im Gegensatz zu Zellstoff, bei dem es sich im Wesentlichen um gereinigte Zellulosefasern handelt, aus dem oberirdischen Teil der Ganzpflanze bestehen, enthalten sie alle Komponenten, die in grasartigen Pflanzen vorkommen, also neben den für die Papierherstellung notwendigen Fasern, auch leichter lösliche Komponenten wie Proteine, Hemicellulosen und andere Kohlenhydrate (z. B. Pektine, Oligomere, Monomere).

Für den Einsatz der Pellets zur Papierherstellung werden sie in Wasser aufgeschlämmt, mit Zellstoff vermischt und der Faserbrei über verschiedene Konditionierungsstufen auf die Papiermaschine aufgegeben (Stoffauftrag), wo über diverse Entwässerungsstufen aus Sieben, Press- und Trocknungswalzen letztendlich aus dem aufgeschlämmten Faserstoff eine kontinuierliche Papierbahn hergestellt wird. Bei der Aufschlämmung der Pellets geht der oberflächennahe Teil der Nichtfaserbestandteile des Grases in Lösung oder wird zumindest suspendiert und gelangt dann bei der Entwässerung der Papierbahn als Siebwasser in den Flüssigkeitskreislauf der Papiermaschine, der aus Gründen der Abwasserminimierung mit möglichst wenig Frischwasseranteil gefahren wird. Die löslichen und kleinstmolekularen Grasinhaltsstoffe stellen eine ideale Nährstoffgrundlage für Mikroorganismen dar, so dass, begünstigt auch durch die Prozesswärme, ein verglichen mit einem reinen Zellstoffprozess verstärktes Wachstum von Mikroorganismen stattfindet, was zu Ablagerungen, Klumpenbildung und Verstopfungen innerhalb der Papiermaschine führen kann. Der Papierherstellungsprozess muss dann vorzeitig abgebrochen und die Maschine aufwändig gereinigt werden mit einem zusätzlichen Anfall von organisch belastetem Abwasser.

Um diese Prozessstörungen zu verhindern, müssten die störenden Bestandteile aus dem Faserbrei vor dem Stoffauftrag abgetrennt werden und einer gesonderten Behandlung zur Weiternutzung oder Entsorgung unterzogen werden. Die Untersuchung der Abtrennung der löslichen und suspendierten kleinstmolekularen Bestandteile aus dem Pelletmaterial war Gegenstand dieses Arbeitspakets. Bei der Auswahl der Abtrennverfahren wurde Wert daraufgelegt, dass diese auch unter den technischen Bedingungen der Papierherstellung angewendet werden können.

Das Versuchsmaterial wurde von einer Papierfabrik zur Verfügung gestellt: es handelte sich um Heupellets aus dem Allgäu und aus Litauen, wobei das Material aus Litauen auch in gemahlener Form vorlag (Abbildung 1 und Tabelle 1). Die Pellets haben einen Durchmesser von 8 mm bei einer Länge von 10 bis 50 mm. Der Feuchtigkeitsgehalt lag bei ca. 10 %, der Organik-Anteil belief sich auf ca. 80 % der Trockenmasse.





Abbildung 1: Heupellets aus Litauen, am Stück und gemahlen, und aus dem Allgäu (v.li.)

Tabelle 1: Eingesetztes Probematerial (OTR = organische Trockensubstanz)

Probe Nr.	Bezeichnung	vorhandene Menge (g)	TR (%)	OTR (%)
1	Graspellets Litauen 10.1.19	520,0	89,97	80,88
2	Probe 1, gemahlen	367,5	90,54	84,01
6	Allgäu 2018	830,1	93,43	76,88

### Experimentelle Durchführung:

11 g Pellets wurden in 200 ml Wasser aufgeschlämmt und dann unter verschiedenen Temperaturen, pH-Werten und Inkubationszeiten unter Schütteln inkubiert. Anschließend erfolgte eine fest-flüssig-Trennung durch Dekantieren/Zentrifugieren, es ergibt sich ein Überstand mit der extrahierten Organik und ein Pellet mit den „gewaschenen“ Fasern. Die Flüssigkeit im Überstand wurde untersucht.

Da die Löslichkeit der Störstoffe vom pH-Wert der Temperatur und der Extraktionsdauer abhängig sein kann, wurden folgende Versuchsbedingungen für die Extraktion untersucht:

Zwei Temperaturen: Raumtemperatur und 50 °C,

drei pH-Werte: pH 5, 7, 8,

Inkubationsdauer: 30 und 60 Minuten,

Es wurden auch Mehrfachextraktionen untersucht sowie das zusätzliche Homogenisieren der Probe vor der Extraktion mit einem Laborhomogenisator (IKA-Ultra-Turrax). Für jede Bedingung wurden zwei parallele Versuchsansätze gefahren.

Es wurden folgende Parameter bestimmt:

pH-Wert, Volumen, CSB, TR/OTR, Protein, Glucose, Xylose, Kohlenhydrate, Stickstoff und Phosphat.

**Ergebnisse:**

Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete

In Tabelle 2 sind exemplarisch die Analysenergebnisse der Extraktion von Probe 2 bei 50 °C dargestellt. Prozentangaben beziehen sich auf die Gesamtmasse der eingewogenen Probe, „mg/g“ bezieht sich auf ein Gramm der Probenmenge. Die Ergebnisse von allen 3 Proben sind in den Diagrammen dargestellt.

**Tabelle 2: Messdaten von der Extraktion von Probe 2 bei 50 °C.**

Inkubation bei 50 °C			Überstände				Pellets		
Probe	pH-Wert	Vol. (ml)	CSB (mg/l)	TR (%)	TR (mg/g)	OTR (%)	OTR (mg/g)	TR (%)	OTR (%)
pH 5 / 30 min	5,22	156	9499	0,93	131,89	0,77	109,20	17,37	16,35
pH 5 / 60 min	5,23	152	9174	0,93	128,51	0,76	105,02	16,58	15,62
pH 7 / 30 min	6,65	154	9516	0,93	130,20	0,59	82,60	16,39	15,36
pH 7 / 60 min	6,56	151	9576	0,94	129,04	0,62	85,11	15,95	15,02
pH 8,5 / 30 min	7,44	154	9657	0,96	134,40	0,66	92,40	16,02	15,10
pH 8,5 / 60 min	7,43	152	9779	0,96	132,65	0,72	99,49	16,15	15,19

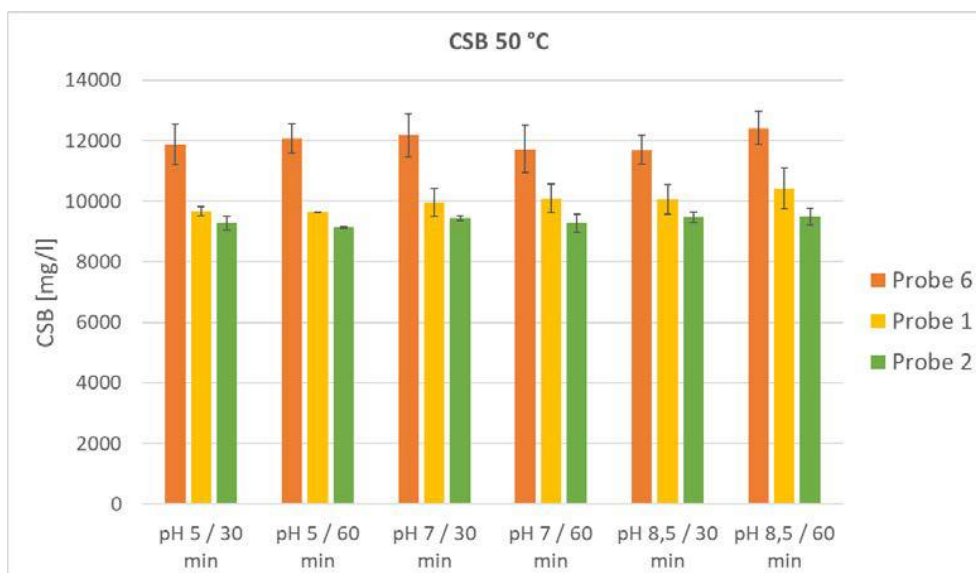
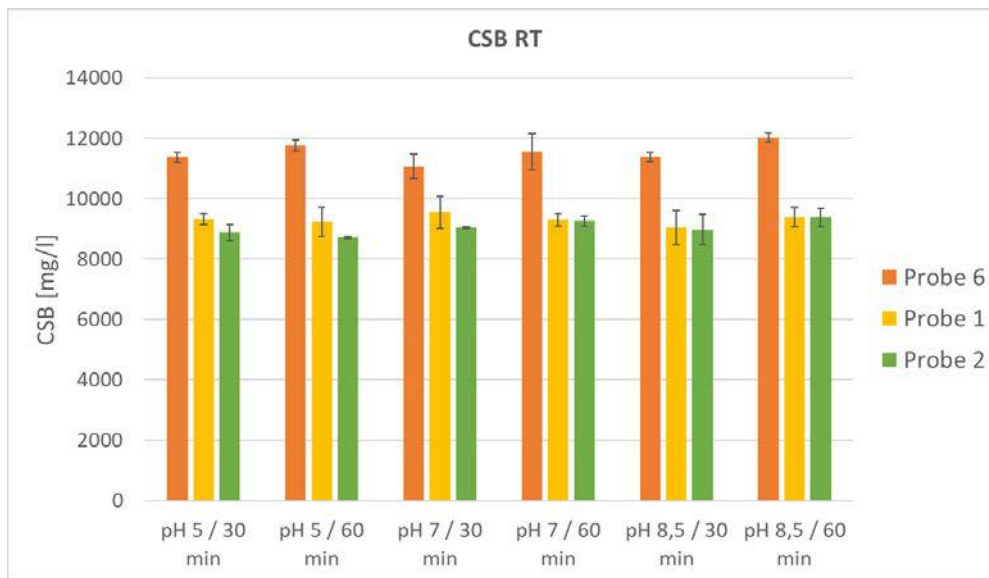
		HPLC					
Protein (LOWRY) (mg/ml)	Protein (mg/g)	c(Glucose) (g/l)	c(Glucose) (mg/g)	c(Xylose) (g/l)	c(Xylose) (mg/g)	Kohlenhydrate (Orcinoltest) (g/l)	Kohlenhydrate (Orcinoltest) (mg/g)
2,38	33,75	1,31	18,58	1,85	26,24	5,74	81,40
2,49	34,41	1,35	18,65	1,90	26,25	8,22	113,59
2,81	39,34	1,30	18,20	1,82	25,48	6,00	84,00
2,86	39,26	1,32	18,12	1,85	25,40	8,48	116,41
3,07	42,98	1,28	17,92	1,82	25,48	8,55	119,70
3,08	42,56	1,28	17,69	1,79	24,73	5,47	75,59

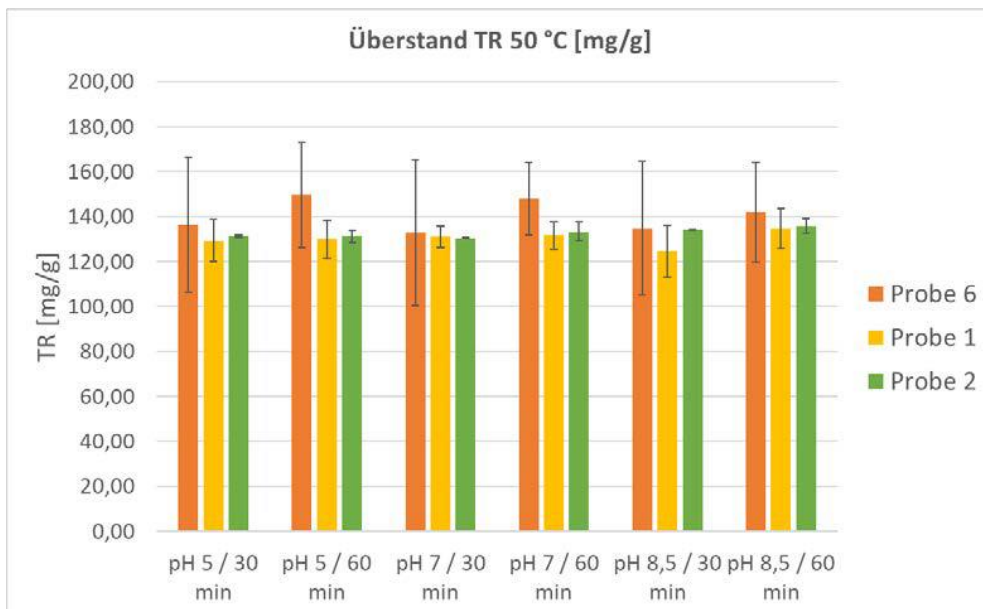
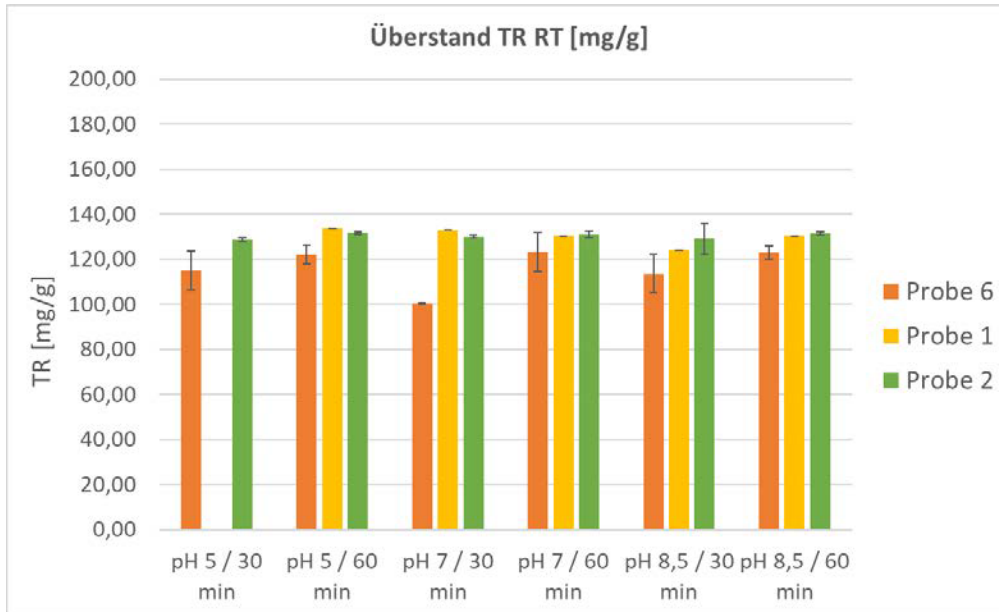
Berechnungen								
Vol Pellet (ml)	CSB in Überstand (mg)	TR im Überstand (g)	OTR im Überstand (g)	Protein in Überstand (mg)	KH in Überstand (mg)	TR in Pellets(g)	TR Pellet/TR gesamt (%)	Vol Pellet/ Vol gesamt(%)
55	1481,84	1,45	1,20	371,28	895,44	9,55	86,82	26,07
59	1394,45	1,41	1,16	378,48	1249,44	9,78	87,37	27,96
57	1465,46	1,43	0,91	432,74	924,00	9,34	86,71	27,01
60	1445,98	1,42	0,94	431,86	1280,48	9,57	87,08	28,44
57	1487,18	1,48	1,02	472,78	1316,70	9,13	86,07	27,01
59	1486,41	1,46	1,09	468,16	831,44	9,53	86,72	27,96

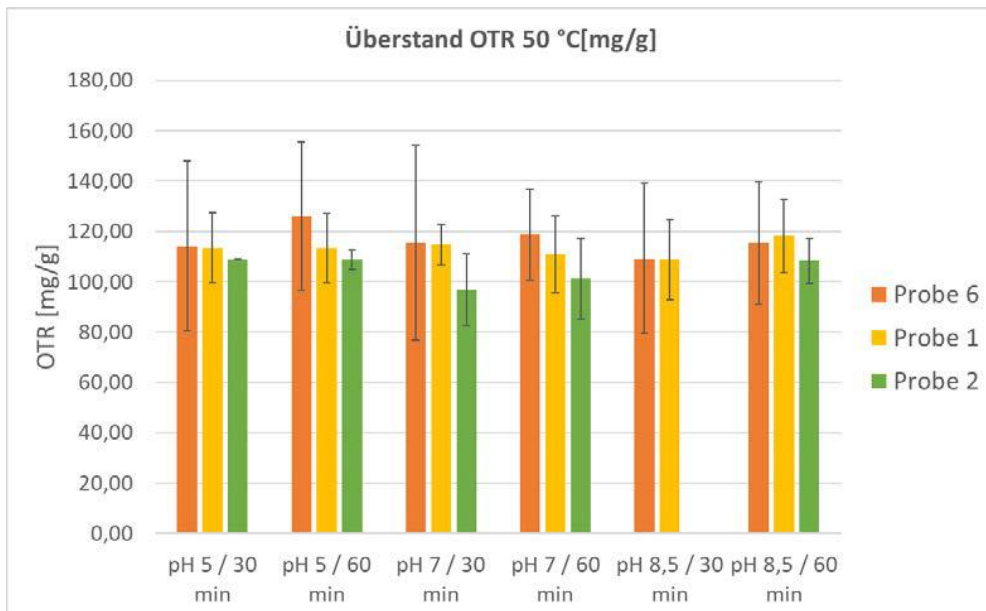
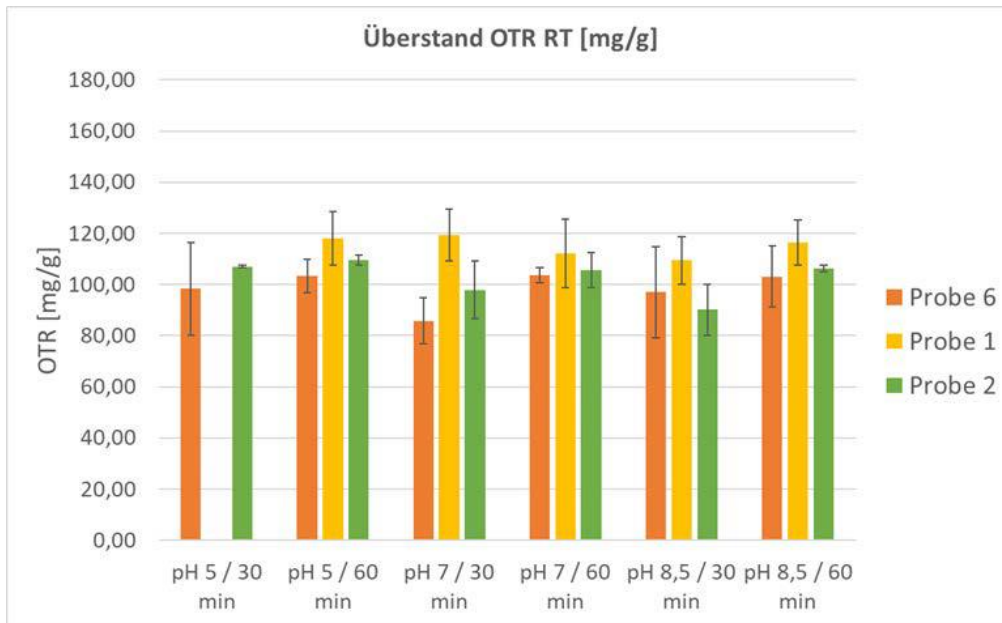
Die Diagramme in Abbildung 2 zeigen die aus zwei Parallelversuchen gemittelten Messwerte des gelösten CSB, die TR- / OTR-Werte und die Protein- und Kohlehydratkonzentration im Überstand. Die Resultate zeigen Tendenzen an, da aufgrund der aufwändigen Analytik nur zwei parallele Versuchsansätze innerhalb des Projektumfangs gefahren werden konnten.

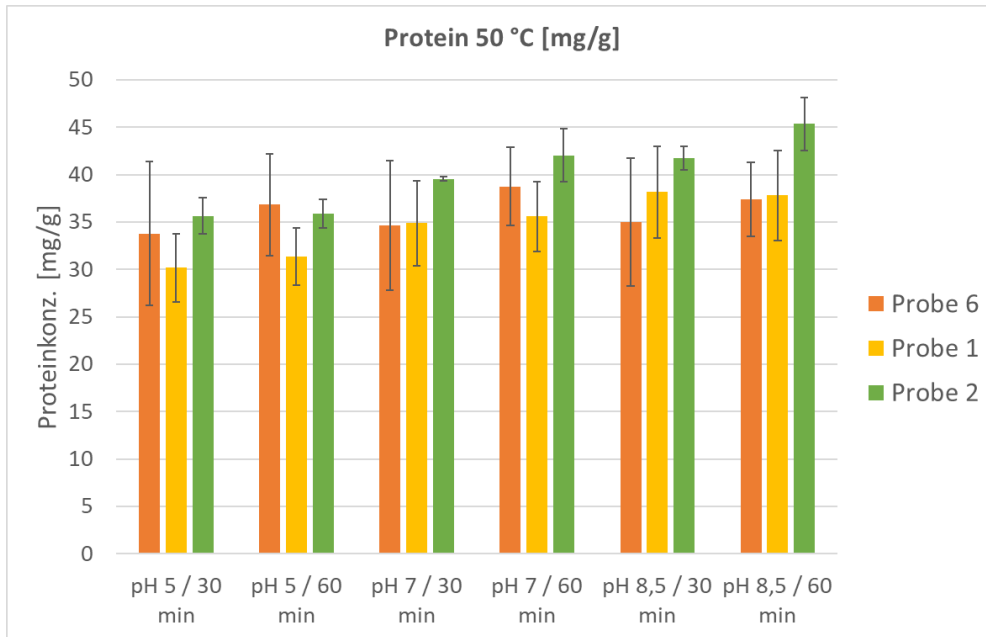
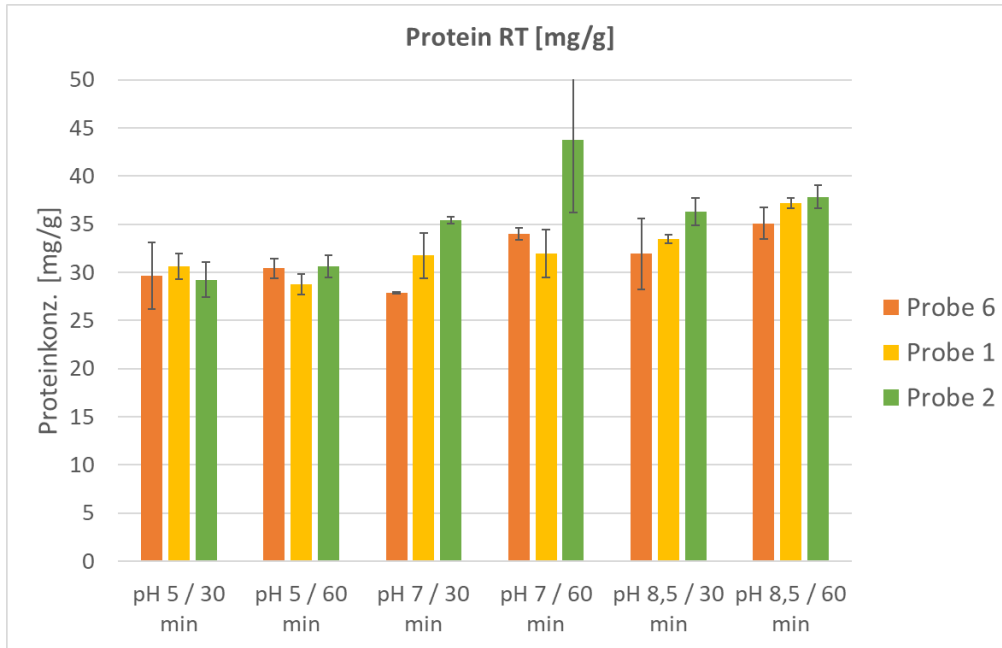
Insgesamt gesehen ist das Extraktionsergebnis innerhalb einer Materialprobe tendenziell unabhängig von den gewählten Versuchsbedingungen wie unterschiedliche pH-Werte und Extraktionsdauern. Die Protein- und Kohlehydratausbeute ist nach den Versuchsdaten bei 50 °C etwas höher als bei RT, möglicherweise bedingt durch die

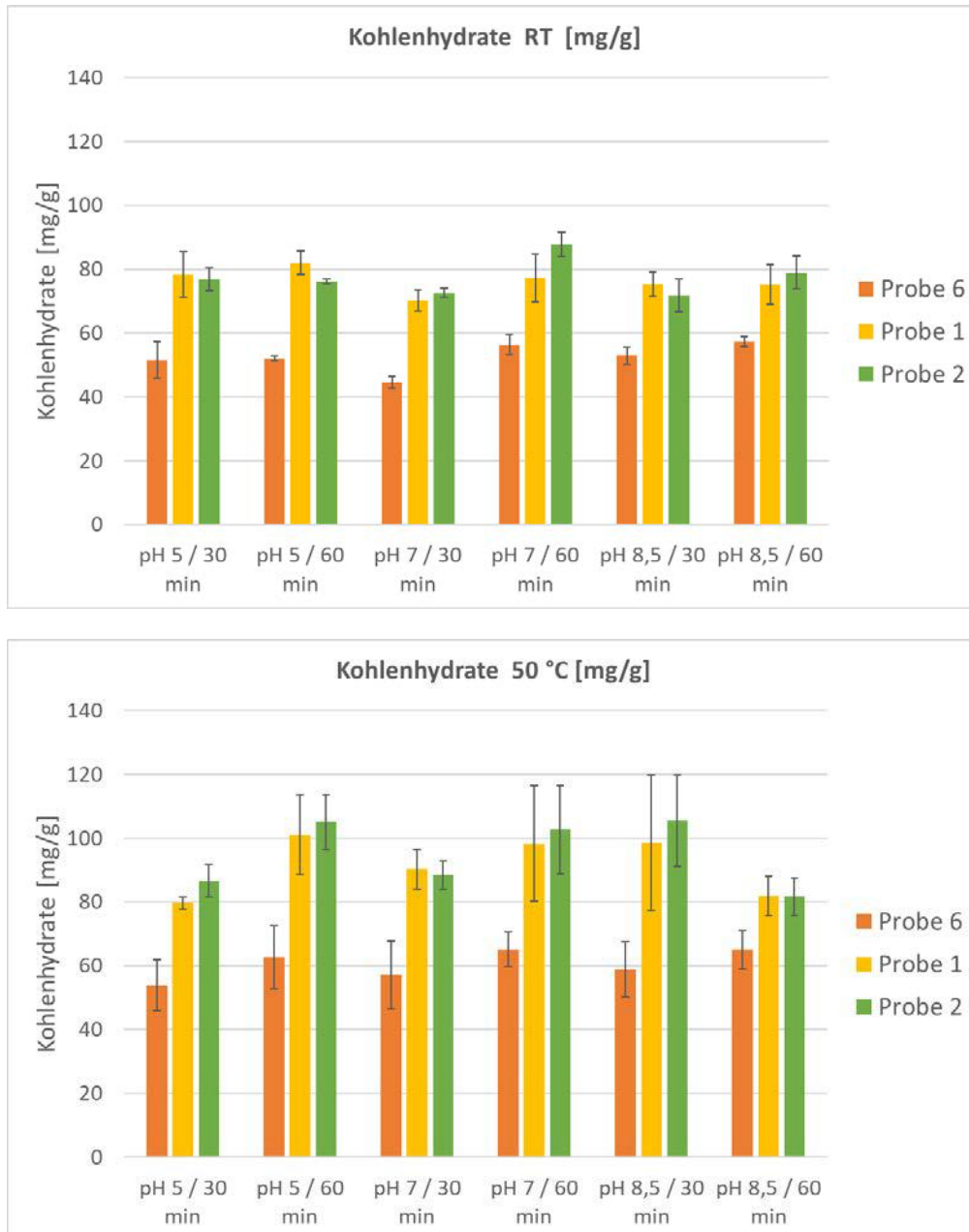
höhere Löslichkeit bei höheren Temperatur. Die erhöhten CSB-Werte von Probe 6 sind wahrscheinlich durch die Versuchsdurchführung verursacht, da alle anderen Messwerte auf die Pellet-Einwaage bezogen sind und keine vergleichbaren Abweichungen zeigen. Die Ausbeute an Protein und Kohlenhydraten ist bei den gemahlene Probe 2 größer als bei der nicht gemahlene Probe 1, bedingt durch die wesentlich größere Materialoberfläche bei den gemahlene Proben. Probe 6 zeigt einen vergleichsweise deutlich niedrigeren Kohlehydrat-Wert, möglicherweise bedingt durch unterschiedliche Erntezeitpunkte oder Klimateinflüsse der Proben aus Litauen und Allgäu. Über die HPLC-Analytik wurden Glucose und Xylose als lösliche Zucker nachgewiesen mit einem etwas höheren Anteil an Xylose. Zusammenfassend kann man sagen, dass sich durch die wässrige Extraktion etwa 10 – 12 % der Organik aus dem Heu in gelöster Form abtrennen lässt, bei moderaten Temperaturen und pH-Werten. Der bei der Extraktion freigesetzte CSB beträgt ca. 150 mg pro g Heupellet.











**Abbildung 2: Gemittelte Messwerte (aus zwei Parallelversuchen) des gelösten CSB, die TR- / OTR-Werte und die Protein- und Kohlehydratkonzentration im Überstand bei RT (Raumtemperatur) und 50 °C.**

Die Konzentrationen der Inhaltsstoffe im Überstand sind abhängig vom gewählten Flüssigkeits-Feststoff-Verhältnis in der Extraktion, so dass hier noch Variationsmöglichkeiten bestehen, je nachdem wie es für die Weiterverarbeitung des Überstandes günstig ist. D. h. wenn es die Extraktionsapparatur zulässt, könnte mit weniger Wasser gearbeitet werden und damit noch höhere Inhaltsstoffkonzentrationen erhalten werden, was für die weitere Nutzung der Extrakte vorteilhaft wäre.

Für eine noch weitergehende Abtrennung von solubilisierbaren Komponenten wurde eine Mehrfachextraktion mit und ohne Ultra-Turrax-Behandlung (UT, Labor-Dispergiergerät) untersucht. Dazu wurde die Probe 6 bei pH 7, 50 °C, dreimal hintereinander für 30 min extrahiert mit und ohne Homogenisierung (jeweils 30 sec).

Tabelle 3 zeigt die Analysenergebnisse im Vergleich zur Einfachextraktion ohne Homogenisierung.

Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete

**Tabelle 3: Messdaten der Mehrfachextraktion im Vergleich zu Einfachextraktion von Probe 6 mit und ohne Ultra-Turrax-Behandlung. Die dargestellten Werte bei der Mehrfachextraktion sind die Summe der 3 Einzelwerte.**

Probenbehandlung	CSB (mg/l)	TR (mg/g)	OTR (mg/g)	Protein (mg/g)	Kohlenhydrate (mg/g)
1-fach-Extraktion	12254	119,49	91,55	36,91	54,83
3-fach-Extraktion ohne UT	11954	109,09	84,65	26,71	54,28
	7328	58,40	45,60	13,76	28,56
	4684	39,31	31,11	10,45	18,48
Summe	23966	206,8	161,36	50,92	101,32
3-fach-Extraktion mit UT	13132	114,33	77,67	29,41	57,60
	8004	67,20	52,36	17,28	32,12
	4992	48,51	39,02	14,03	23,62
Summe	26128	230,04	169,05	60,72	113,34

Bei der Mehrfachextraktion wurde der Extraktgehalt fast verdoppelt, der zusätzliche Aufwand der Homogenisierung ergab eine Verbesserung im Bereich von ca. 10 %. Der Extraktionserfolg ist im Wesentlichen auch davon abhängig, wie gut es gelingt, die Fasern nach der Extraktion zu entwässern. Im Laborversuch waren die Pellets verhältnismäßig groß, weil die Fasern schlecht sedimentierten, so dass noch viel Extrakt zurückgehalten worden war, der dann erst bei der zweiten und dritten Extraktion ausgewaschen wurde. Dies könnte bei einer technischen Anlage besser funktionieren und es könnte ein höherer Abtrenngrad der löslichen Bestandteile durch bessere Entwässerung auch ohne Mehrfachextraktion erreicht werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Extraktion (Waschung) des Heus 10 - 20% der Trockenmasse in gelöster bzw. suspensierter Form abgetrennt werden kann und dadurch die für die Papierherstellung verbleibenden Fasern deutlich weniger lösliche Störstoffe enthalten.

### 3.1.2 Bereitstellung von Fasern für die Laborpapierherstellung

Mit den über Extraktion der löslichen Komponenten gereinigten Fasern sollte in einer Laborapparatur Papier hergestellt werden, um die Eigenschaften des Produkts im Vergleich zu dem aus bisheriger Verfahrensweise zu überprüfen.

Für die Papierherstellung sind Fasern mit Längen von 2-4 mm vorteilhaft.

Es wurde versucht, die feuchten Fasern aus dem Extraktionsprozess durch ein Siebverfahren nach der Länge zu klassifizieren, was aber nicht gelungen ist, da es auf dem Sieb zu Verklumpungen und Verstopfungen kam (Abbildung 3).





**Abbildung 3: Siebversuche mit feuchten Fasern**

Alternativ dazu wurden Siebversuche mit trockenen Fasern durchgeführt, was sich als erfolgreich erwiesen hat. Dazu wurden die Heupellets (4,5 kg, Probe 1) in einer Messermühle (Retsch-Grindomix) zerkleinert und dann durch eine Siebkaskade nach Fasergröße aufgetrennt. Somit wurde eine Grobfraction, eine Mittelfraction in der gewünschten Faserlänge und ein feiner Restanteil gewonnen (Tabelle 4, Abbildung 4). Da die Heupartikel und Fasern eher lang und dünn sind, sind die Fasern der jeweiligen Fraction durchaus auch länger als die nominelle Maschenweite der Siebe, was aber eher von Vorteil für die Papierfestigkeit ist. Ein großer Teil der abtrennbaren Störstoffe ist bereits in der Feinfraktion im untersten Sieb enthalten.

**Tabelle 4: Auftrennung der Heupellets durch Mahlen und Sieben: Die mittlere Fraction zur Papierherstellung eingesetzt.**

Fraction	Siebgröße	TR (%)	OTR (%)	CSB (mg/l)	Menge (g)
fein	< 1,12	0,41	0,33	3810	901
mittel	< 2,24 - >1,12	0,41	0,33	4022	2073
grob	> 2,24 mm	0,38	0,31	3790	448

Die Mittelfraction wurde kurz vor dem Einsatz zur Labor-Papierherstellung durch einmalige Extraktion von löslichen Bestandteilen befreit und unmittelbar verarbeitet. Von dieser Fraction konnten durch das Auswaschen 5,8 % TR und 5,0 % OTR abgetrennt werden. Das Washwasser wurde in der Folge für die Versuche zur aeroben Abwasserreinigung verwendet und die Feinfraktion für die Versuche zur Biogasproduktion eingesetzt.

Für die beschriebenen Versuche wurden Laborsiebe der Firma Retsch mit geeigneten Maschenweiten verwendet.



**Abbildung 4: Siebfraktionen nach der Mahlung der Graspellets: Fein, mittel, grob (s. Tabelle 4)**

### 3.1.3 Ergebnisse aus der Labor-Papierherstellung

Zur Projektrealisierung war es erforderlich, die benötigten Papiere im Labor auf einem Frank Blattbildner (gem. DIN 54 358) herzustellen. Da sich hierbei nur isotrope Blätter erzeugen lassen, wurden für die Untersuchungen der Verarbeitbarkeit zusätzlich Papiere und Kartons auf einer Pill Nassvlies-Laboranlage mit 306 mm Formationsbreite (Leihgabe Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff - Forschung TITK) hergestellt. Zur Trocknung wurde an der Nassvliesanlage ein Mathias Durchlauf Trockner KTF 500 eingesetzt. Zur Herstellung des Versuchsmaterials wurden das vom IGB gewaschene Fasermaterial, ungewaschene Pellets aus derselben Charge sowie Lang- und Kurzfaserezellstoff eingesetzt.

Die Durchführung und die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen an den Probepapieren sind weiter hinten in Abschnitt 3.7 dargestellt und lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Bei der Herstellung der Papierbahn auf der Nassvliesanlage konnte bei der Formation der Bahn beim Einsatz von gewaschenem Faserstoff am Sieb eine gleichmäßigere Blattbildung und eine bessere Ablösung der Papierbahn vom Sieb beobachtet werden.
- Durch den Einsatz von gewaschenem Gras konnte eine Reduzierung der Fehlgerüche im Robinson-Test festgestellt werden.
- Materialfestigkeit: Beim Zugversuch konnte beim gewaschenen Faserstoff eine Erhöhung der Bruchlast um 14% im Vergleich zum ungewaschenen ermittelt werden.  
Mit einer durchschnittlichen Reißlänge von 4200 Metern beim gewaschenen Faserstoff liegt das Graspapier im Festigkeitsbereich von Testliner, der für die Papiere aus den Altpapiersorten 1.02 und 1.04 mit 3000 Metern und größer angegeben wird. Im Vergleich zu Frischfasermaterial auf der Basis von Zellstoff liegen die gemessenen Werte weit unterhalb der dafür in der Literatur angegebenen Werte, die 6000 Meter und mehr erreichen.

Durch die Vorbehandlung der Heufasern sind also die Eigenschaften der daraus hergestellten Probepapiere in allen untersuchten Kriterien besser geworden oder

zumindest gleichgeblieben, so dass beim Einsatz der gereinigten Fasern in der Produktion wohl in papiertechnischer Hinsicht keine Nachteile zu erwarten sind, mit den Vorteilen eines störungsfreieren Betriebs der Produktion.

## 3.2 Analytik der Inhaltsstoffe des fraktionierten Heus

### 3.2.1 Analytik des Heus und der wässrigen Phase nach Aufschlammung im Labor

Die im vorliegenden Projekt zum Zuge kommenden analytischen Verfahren sind folgende:

- Volumen- und Gewichtsmessungen mit geeigneten Messgefäßen und Waagen
- Trockengewichts- und Glühverlustmessungen zur Bestimmung der Trockensubstanz TR und organischen Trockensubstanz OTR
- CSB-Messungen über Dr. Lange-Schnelltests
- FIA-Messungen für Stickstoff- und Phosphatverbindungen
- Bestimmung von gelösten Proteinen über die Lowry-Methode
- Bestimmung von Kohlenhydrate über den Orcinol-Test
- Bestimmung von Einzelzucken über eine geeignete HPLC-Methode (Ionenaustausch-Chromatographie mit RI-Detektion)
- Rohfaserbestimmung, angelehnt an die vanSoest-NDF-Faserbestimmung

Die meisten dieser analytischen Verfahren sind bereits in den Untersuchungen zur Abtrennung der löslichen Bestandteile in 3.1.1 zum Einsatz gekommen.

Die Zusammensetzung der Heupellets und der in der Extraktion abgetrennten Feststoffe (Fasern) erfolgte nach der Rohfaserbestimmungsmethode nach vanSoest. Dabei werden nacheinander zunächst niedermolekulare lösliche Bestandteile wie Proteine, Kohlenhydrate und Fette abgetrennt, dann die Hemicellulosefraktion und anschließend die Cellulosefraktion, jeweils mit den Hydrolyseprodukten Xylose und Glucose. Die nächste Fraktion ist dann das Lignin und es verbleibt ein nicht weiter definierter Rest aus Asche und weiteren organischen Bestandteilen. Der Aufarbeitungsgang ist relativ kompliziert, es wurden 3-fach-Bestimmungen durchgeführt.

Es wurden die Heupellets 1 und 6, sowie die Faserfraktionen (Pellets) bei der Mehrfachextraktion von Probe 6 untersucht (Tabelle 5).

Die Daten zeigen, dass im Bereich der löslichen Komponenten und auch beim Ligningehalt offenbar Unterschiede zwischen Probe 1 und 6 bestehen. Diese könnten auf unterschiedliche Erntezeitpunkte und Verarbeitungsmethoden zurückzuführen sein. Das bedeutet, dass die papiertechnische Eignung der Heupellets von Charge zu Charge schwanken kann und durch die Vorbehandlung im günstigen Fall angeglichen werden kann. Um dies genauer zu untersuchen, müsste man noch weitere Daten sammeln, insbesondere die Herkunft und Qualität der Rohmaterialien in Zusammenhang setzen mit der Vorbehandlung und dem Verlauf der Papierproduktion.

Die Abnahme des Gehalts an niedermolekularen Substanzen bei den Pellets aus der Extraktion und die gleichzeitige Anreicherung von Cellulose und Lignin ist bedingt durch das Auswaschen der löslichen Komponenten und bestätigt den gewünschten Effekt der Vorbehandlung.

Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete

**Tabelle 5: Rohfaserbestimmung der Proben 1 und 6 sowie der Pellets bei der Mehrfachextraktion von Probe 6. Mittelwerte aus Dreifachbestimmungen.**

Probe	Anteil wasserl. niedermolekulare Substanzen + Lipide (%)	Fraktion wasserlsl. und niedermol.		Anteil Pectin + Hemicellulose (%)	Fraktion Hemicellulose	
		c(Protein) (mg/g Einwaage)	c (Kohlenhydrate) (mg/g Einwaage)		c(Glucose) (mg/g Einwaage)	c(Xylose) (mg/g Einwaage)
6	31,49	59,68	37,07	30,62	15,64	69,77
6 (1. Pellet)	18,67	47,73	23,61	36,71	14,03	81,18
6 (2. Pellet)	19,75	44,11	21,64	30,72	7,09	78,27
6 (3. Pellet)	24,41	44,94	17,65	29,92	12,86	91,26
1	21,48	50,02	54,37	32,55	9,70	89,32

Probe	Anteil Cellulose (%)	Fraktion Cellulose		Anteil Lignin (%)	übrige anorganische Substanzen (%)	übrige organische Substanzen (%)
		c(Glucose) (mg/g Einwaage)	c(Xylose) (mg/g Einwaage)			
6	20,04	80,85	10,99	1,28	4,59	12,01
6 (1. Pellet)	25,43	160,53	26,03	6,90	4,30	8,00
6 (2. Pellet)	27,40	159,83	28,69	6,12	5,39	10,61
6 (3. Pellet)	27,88	170,75	29,29	6,50	3,94	7,70
1	22,40	149,05	34,54	9,30	5,95	8,33

### 3.2.2 Heupellet-Versuche im Pilotmaßstab

Bei einem Papiermaschinenhersteller wurden im Papiertechnikum Versuche mit Heu durchgeführt. Es sollte getestet werden, wie sich das neue Ausgangsmaterial auf den üblichen papiertechnischen Apparaten bearbeiten lässt. Bei den verwendeten Apparaten handelt es sich um Pilotgrößen, deren Ergebnisse auf den Produktionsmaßstab skaliert werden können.

Die Versuchsapparatur bestand im ersten Teil der Prozessstrecke aus einem Pulper zum Aufschlännen der Heupellets, mehreren Stapeltanks und Apparaten zum Waschen und Wasserentzug aus der Pulpe wie dem Eindicker, der Schneckenpresse und der Siebpresse. Im zweiten, anschließenden Teil der Prozessstrecke werden die Fasern sortiert, gereinigt und gemahlen, im vorliegenden Fall wurden 2 Fraktionen mit unterschiedlicher Teilchen- bzw. Fasergröße gewonnen (Abbildung 5).

Der Technikumsversuch wurde mit 360 kg Heupellets in 5 m<sup>3</sup> Wasser gestartet, die suspendierte Heubrühe in Stapeltanks gelagert und von dort für die einzelnen Verfahrensschritte abgerufen. Da die Stoffdichte für die Verfahrensschritte aufgrund

betrieblicher Störungen immer wieder angepasst wurde war es nicht möglich eine Massenbilanz bei den einzelnen Geräten und für den gesamten Prozessablauf aufzustellen.

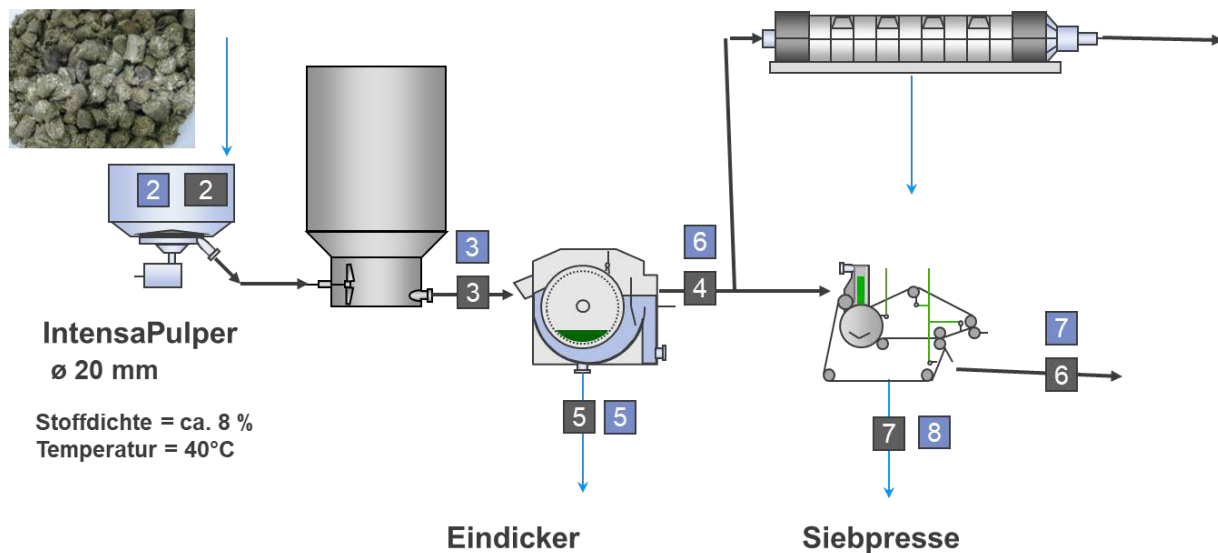
Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete

Die erste Versuchsserie wurde mit reinem Heu gefahren, wobei einige der Verfahrensschritte, wie die Schneckenpresse und der Sortierer, unter den gewählten Bedingungen nicht bestimmungsgemäß funktionierten. In einer zweiten Versuchsserie wurde dem Heu 20% Eukalyptuszellstoff beigemischt, was die Eigenschaften der Faseraufschlämmung derart verbesserte, dass die Verfahrensschritte nun ohne größere Probleme durchführbar waren.

## Auflösen und Waschen/Eindicken

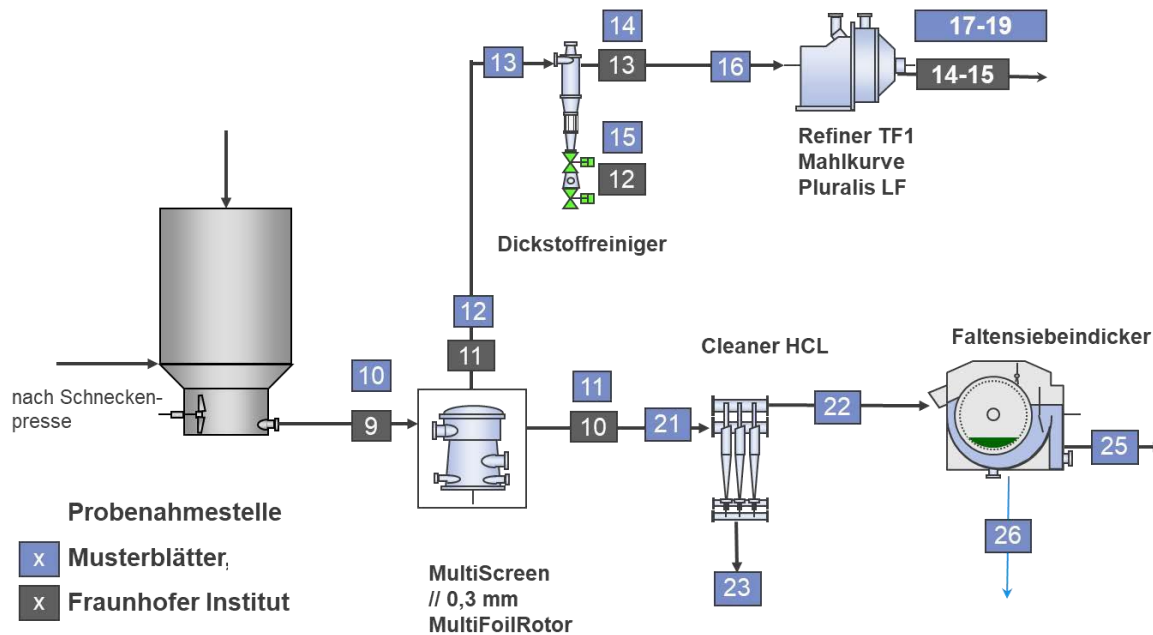
Probenahmestelle

- Musterblätter
- Fraunhofer Institut



# Sortieren, Reinigen und Mahlen

Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete



**Abbildung 5: Verfahrensschaubild der Versuchsstrecke im Technikum. Die Nummern entsprechen den Probenahmestellen. (Quelle: Papiermaschinenhersteller)**

Es wurden vom IGB und vom Papiermaschinenhersteller an jedem Verfahrensschritt Proben genommen. Der Hersteller fertigte von seinen Proben auf speziellen Heiz- und Press-Geräten Labor-Musterblätter an. Die Ergebnisse wurden nicht zur Verfügung gestellt.

Die vom IGB gezogenen Proben wurden analysiert. Die Daten sind in Tabelle 6 dargestellt.

Die Messwerte zeigen, dass die löslichen Bestandteile (CSB, Protein, Ammonium, Phosphat) nach dem ersten Schritt, dem Eindicker (Probe 4 und 5), bereits etwa zur Hälfte abgetrennt wurden und die Fasern im Retentat des Eindickers (3) angereichert werden (hoher TR). Nach dem zweiten Abtrennschritt, der Siebpresse findet sich der größte Teil der löslichen Bestandteile im Filtrat (7) und die Fasern im Retentat (6). In den nachfolgenden Schritten (Sortierer, Refiner) werden nur noch die verbliebenen Fasern bearbeitet und sortiert mit dem Ergebnis einer einheitlichen Faserfraktion, je nach den Einstellungen dieser Prozessschritte.

**Tabelle 6: Analysewerte der bei den Technikumsversuchen beim Papiermaschinenhersteller generierten Proben**

Probe	Probenahmestelle	Zusammensetzung	TR (%)	OTR (%)	TR Lyophyl-	pH	CSB (ppm)	c(Protein) [g/l]	Ammonium	Phosphat-P
							vom filtrierten Überstand	LOWRY	NH <sub>4</sub> -N (mg/l) vom filtr. Überstand	Phosphat-P (mg/l) vom filtr. Überstand
1	Pulper	100 % Gras	7,40	6,57	11,16	6,3	17065	4,71	18,70	93,10
3	Stapeltank	100 % Gras	4,43	3,88	5,5	6,86	8585	2,69	5,97	30,90
4	nach Eindicker	100 % Gras	8,09	7,44	10,92	6,68	6545	1,97	4,97	30,10
5	Filtrat Eindicker	100 % Gras	1,63	1,21	1,75	6,84	4083	2,85	5,90	34,60
6	Retentat Presse?	100 % Gras	48,33	46,08	47,19	-	-		-	
6a	Retentat Presse?	100 % Gras	30,69	29,28	30,52	-	-		-	
7	Filtrat Siebpresse	100 % Gras	1,11	0,85	1,35	6,6	4194	1,54	7,41	16,70
	Pellet Siebpresse?	100 % Gras	85,57	76,11	86,89	-	-		-	
9	nach Siebpresse	100 % Gras	2,88	2,71	3,22	5,76	1244	0,53	0,34	0,90
10	nach Siebpresse	100 % Gras	1,25	1,12	1,21	6,09	960	0,47	0,30	0,15
11	Sortierer Reject	100 % Gras	4,36	4,16	5,25	6,54	1536	0,62	0,48	1,54
18	nach Refiner	100 % Gras	3,75	3,58	3,92	5,62	788	0,32	0,32	0,16
26	Filtrat Faltensieb	100 % Gras	0,35	0,28	0,38	5,77	768	0,43	0,31	0,02
28	vor Sortierer	20 % Zellstoff	2,93	2,78	3,44	6,7	1228	0,49	2,24	1,64
29	Filtrat Sortierer	20 % Zellstoff	1,34	1,24	1,47	5,94	1192	0,49	2,18	1,25
30	Reject Sortierer	20 % Zellstoff	5,07	4,90	5,83	5,6	1504	0,53	2,23	1,19
35	Ausgang Refiner	20 % Zellstoff	4,04	3,87	4,39	5,73	1176	0,43	1,67	24,20
44	Filtrat Faltensieb	20 % Zellstoff	0,25	0,20	0,32	6,62	892	0,41	0,70	0,36

Aus den Ergebnissen dieser Technikums-Versuche kann folgendes abgeleitet werden:

Das aktuelle technische Instrumentarium der Pulpebehandlung vom Rohstoff bis zur Aufgabe auf die Papiermaschine ist durchaus in der Lage, auch den Rohstoff Heu zu bearbeiten und die für den Papierprozess unerwünschten Bestandteile abzutrennen. Unter der Maßgabe, dass sich aktuell bundesweit schon ca. 20 Papierfabriken mit der Herstellung von Graspapier beschäftigen und diverse Produkte im Verpackungsbereich bereits im Umlauf sind, kann davon ausgegangen werden, dass die vom Zellstoff abweichenden Eigenschaften und Probleme des Heus als neuartiger Rohstoff von der vorhandenen Technik bei der Herstellung und Verarbeitung des Graspapiers beherrscht werden können (\*). Möglicherweise sind hier Betriebe im Vorteil, die bisher schon mit der Nutzung von Altpapier als Rohstoff befasst waren. Hier sind ähnliche Probleme mit löslichen kleinemolekularen Komponenten zu bewältigen und es werden dabei dann wohl auch erhöhte Anforderungen an die Abbaukapazität der Abwasserreinigungsanlagen gestellt. Vorteilhaft sind hier möglicherweise anaerobe Stufen zur Gewinnung von Energie in Form von Biogas aus der abgetrennten gelösten Organik.

\*Quellen:

Papier von der Wiese, Schwäbisches Tagblatt Tübingen, Sonderbeilage „Unternehmen“, Ausgabe 29, S. 16, 7. Oktober 2019.

Das Papier von der Wiese, VDI-Nachrichten Ausgabe 13, S. 23, 29. März 2019

### 3.3 Untersuchungen zur Verwertungsmöglichkeit der abgetrennten organischen Inhaltsstoffe

#### 3.3.1 Literaturrecherche zur Ermittlung der Verwertungsmöglichkeiten der Nichtfaserfraktion

Es gibt nur wenige aktuelle technische Beispiele, die sich mit dieser Thematik befassen. Von anderen Graspapier herstellenden Papierfabriken ist über eine ähnliche Problematik nichts bekannt. Die im Betrieb anfallende Organik wird über die jeweilige Abwasserreinigungsanlage bzw. Methanisierungsstufe entsorgt, bzw. energetisch genutzt.

Die vom Heu abgetrennte Nicht-Faser-Fraktion weist unter den verwendeten Versuchsbedingungen einen CSB von 9,5 g/l auf, sie enthält 2,8 g/l Proteine und 8,0 g/l Kohlenhydrate (Hemicellulosen), darunter Glucose und Xylose. Eventuell entsteht bei der Faseraufbereitung noch eine Faserfraktion, die für die Papierbildung nicht geeignet ist, und die damit ebenfalls ein Reststoff wäre.

Die Verwertung kann entweder stofflich oder energetisch erfolgen.

Bei einer **stofflichen** Nutzung werden einzelne Komponenten der Nicht-Faser-Fraktion einer bestimmten Nutzung zugeführt, das bedingt aber unter Umständen eine Abtrennung und Aufkonzentrierung dieser Komponenten vom Rest der Fraktion. Im vorliegenden Fall ist die Konzentration der Inhaltsstoffe verhältnismäßig gering und lässt sich auch nicht durch Modifikation der Extraktionsbedingungen wesentlich steigern, so dass eine Abtrennung und Aufkonzentrierung bestimmter Komponenten sehr aufwändig wäre hinsichtlich des apparativen Aufwands, der Prozesskosten und des Energieeinsatzes. So werden zum Beispiel für Fermentationsverfahren zur Herstellung von mikrobiellen Produkten, wie etwa organische Säuren oder Alkohole, auf Basis von Zuckern wie sie in der abgetrennten Fraktion vorliegen, etwa 50-fach höhere Konzentrationen an möglichst reinen Ausgangsprodukten für einen wirtschaftlichen Prozess benötigt.

Eine mögliche Anwendung wäre die Formulierung eines Flüssigdüngers, wie es z.B. bei dem Flora-Fuel-Verfahren (florafuel AG, München, Info aus Internet) beschrieben ist, wo die Verwendung von Graspresse-saft als Flüssigdünger untersucht wurde.

Eine **energetische** Nutzung wäre über die anaerobe Vergärung zur Erzeugung von Biogas/Strom zu erreichen, wo der anfallende Extrakt direkt eingespeist werden könnte. Dazu ist dann, falls nicht bereits vorhanden, eine zusätzliche Vergärungsstufe im Bereich der Abwasserbehandlung der Papierfabrik vorzusehen. Beispiele für die Vergärung von grasbasierenden Reststoffen sind z. B. Dietz et al. (Ersatz klassischer Faserstoffe durch biogene Reststoffe, Wochenblatt für Papierfabrikation 4/2014) oder bei Block, NaRoTec e.V. („Besuch bei der Bioraffinerie Biowert Industrie GmbH in Brensbach“, Info aus Internet).

Die Abtrennung der löslichen kleinmolekularen Fraktion sollte am Anfang der Faseraufbereitung für die Papiermaschine erfolgen, damit die Fraktion in reiner Form gewonnen werden kann und keine weiteren Stoffe, die für die Papierproduktion benötigt werden, dazu kommen. Evtl. könnten bei einer energetischen Nutzung auch für die Papierherstellung unbrauchbare Faseranteile hinzugefügt werden.



### 3.3.2 Labor-Versuche zur Biogasproduktion mit der Organik-Fraktion

Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete

Die zwei Fraktionen „feine Faserfraktion“ und „grobe Faserfraktion“ (s. Abbildung 4 und Tabelle 4), die beim Fraktionieren der Heupellets gewonnen und nicht für die Papierherstellung eingesetzt wurden, sind als Substrate in Untersuchungen zur Biogasproduktion verwendet worden. Es sollte ermittelt werden, inwiefern die abgetrennten Fraktionen sich als Substrat für die Biogasproduktion eignen. Die Untersuchungen wurden in 1l-Reaktoren im Batch-Betrieb durchgeführt bei 37 ° C. Als Inokulum wurde der Ablauf einer Hochlastfaulung, die mit Klärschlamm als Substrat betrieben wurde, verwendet. Nachdem die Eigengasproduktion aus dem Inokulum nach etwa 24 Tagen allmählich zum Erliegen kam, wurden die Reaktoren jeweils mit dem Substrat gefüttert. Die Menge, die den Reaktoren zugegeben wurde, entsprach jeweils etwa 3 g/l oTR. Der zeitliche Verlauf der Biogasbildung aus den Reaktoren R1 und R3, in denen die feine Faserfraktion untersucht wurde, sowie aus den Reaktoren R4 und R5, in denen die grobe Faserfraktion untersucht wurde, ist in Abbildung 6 dargestellt. Es zeigte sich, dass beide Fraktionen zu Biogas umgesetzt wurden. Die Biogasbildung begann unmittelbar nach Zugabe der Faserfraktionen. Für die Bilanzierung der Biogasbildung aus dem Substrat wurde ein Zeitraum von 30 Tagen ab Zugabe des Substrats betrachtet. Es zeigte sich zunächst ein Unterschied für die zeitlichen Verläufe für beide Substrate. Allerdings stieg die Biogasproduktion für die grobe Fraktion etwa 7 Tage nach Zugabe der Substrate stärker an als für die feine Fraktion. So wurde eine Biogasausbeute für die feine Faserfraktion von 0,3 NL/g oTR<sub>input</sub> und für die grobe Faserfraktion von 0,4 NL/g oTR<sub>input</sub> ermittelt (s. Abbildung 7).

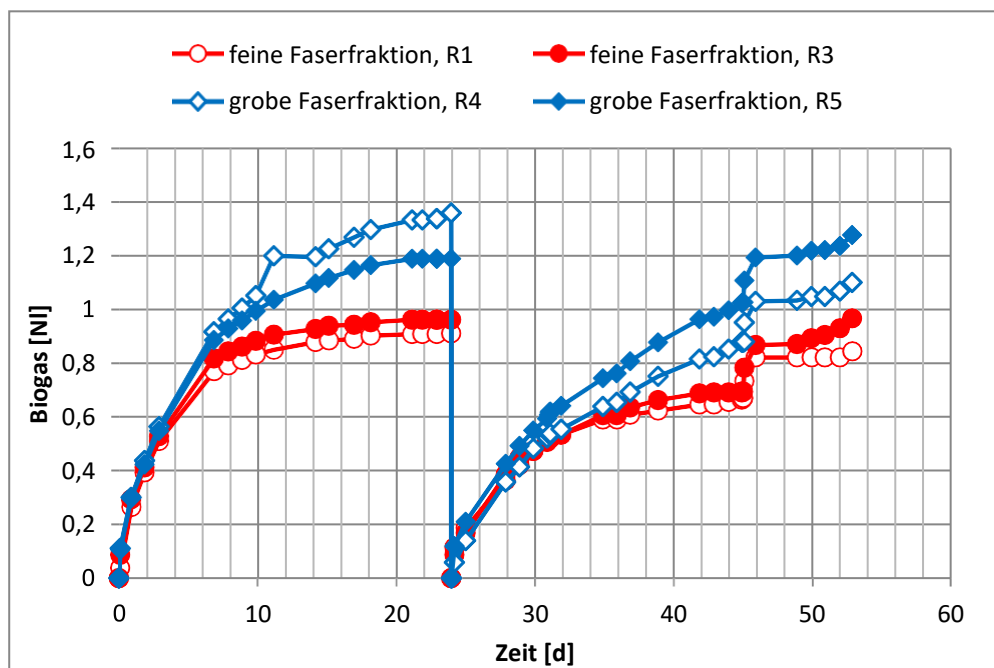
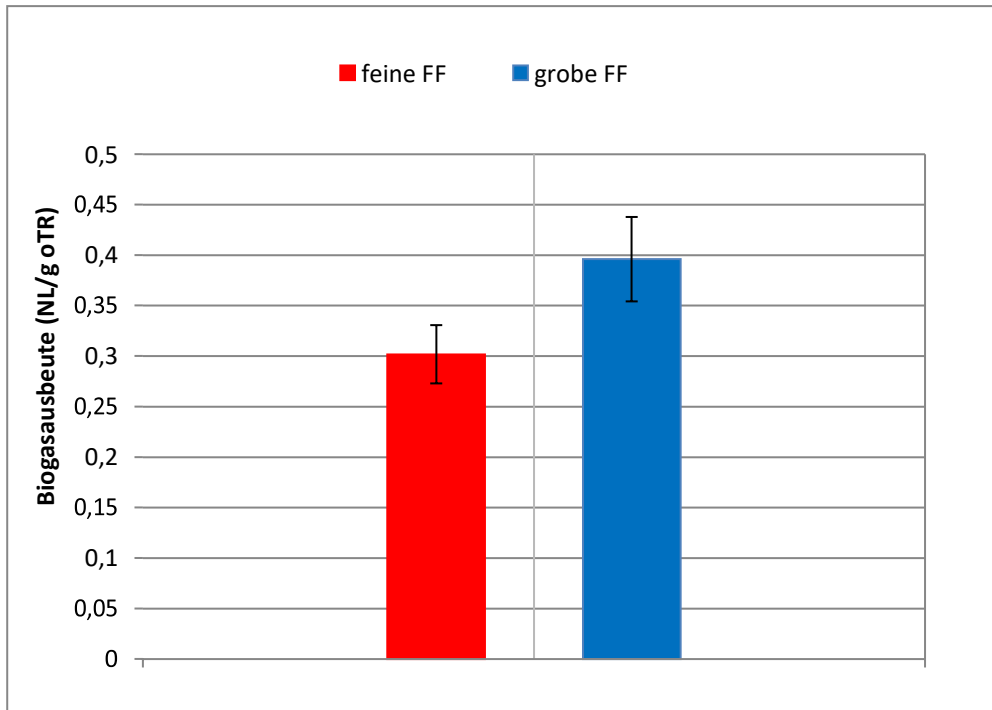


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Biogasbildung in den Reaktoren R1 und R3 (Substrat feine Faserfraktion), sowie in den Reaktoren R4 und R5 (Substrat grobe Faserfraktion). Die Zugabe der Substrate erfolgte, als die Eigengasproduktion in den Reaktoren zum Erliegen kam, jeweils 24 Tage nach Beginn des Experiments.



**Abbildung 7: Biogasausbeute für das Substrat feine Faserfraktion, sowie für das Substrat grobe Faserfraktion (ermittelt aus den Reaktoren R1 und R3, sowie R4 und R5).**

### 3.3.3 Aerober Abbau des Waschwassers

Die Fraktion „mittlere Faserfraktion“ (s. Abbildung 4 und Tabelle 4) aus der Fraktionierung der Heupellets wurde einem Waschvorgang unterzogen, bevor sie für die Papierherstellung eingesetzt wurde. Das dabei gewonnene Waschwasser enthielt alle Inhaltsstoffe der Faserfraktion, die in Wasser löslich bzw. suspendierbar waren und nicht der Papierherstellung zugeführt wurden. Insofern würde dieses Waschwasser nach dem derzeitigen Produktionsprozess von Graspapier, bei der die wasserlösliche bzw. -suspendierbare Fraktion der Heupellets in die Produktion miteingeführt wird und dann als Abwasser anfällt, auch als Abwasserstrom betrachtet werden können. Der aerobe Abbau dieses Waschwassers wurde deshalb in 1l-Reaktoren im Labor in kontinuierlicher Betriebsweise untersucht. In Tabelle 7 sind die Analysenergebnisse des Waschwassers zusammengefasst.

**Tabelle 7: Analysenergebnisse des Waschwassers der mittleren Faserfraktion, 2 Chargen**

Parameter	Probe 1	Probe 2
pH-Wert	6,5	6,52
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	32	32
CSB (mg/l)	9138	9548
CSB <sub>filtriert</sub> (mg/l)	6585	6711
TR (%)	0,92	0,96
oTR (%)	0,75	0,79
oTR/TR (%)	81	82

Das Waschwasser wurde 1:10 verdünnt und so als Substrat eingesetzt. Mit Ammoniumstickstoff wurde das Substrat supplementiert, um eine Stickstofflimitierung zu verhindern. Der Abbau erfolgte bei Raumtemperatur mit einer hydraulischen Verweilzeit von 12 h. Die CSB-Konzentration im Ablauf lag bei etwa 170 mg/l. Der zeitliche Verlauf des CSB in den beiden Vergleichsreaktoren sowie die Gelöstsauerstoffkonzentration sind in Abbildung 8 dargestellt. Es zeigte sich, dass der CSB des Waschwassers zu etwa 80 % abgebaut wurde. Die Nitratstickstoffkonzentration lag bei etwa 4 mg/l, die Phosphatphosphorkonzentration lag bei 2 mg/l. Die Ammoniumstickstoffkonzentration im Ablauf betrug etwa 30 mg/l. Die Nitrifikation erfolgte demnach unvollständig. Das bedeutet, dass etwa 60 % des CSB im Ablauf durch Ammonium verursacht wurde. Da der Ammoniumgehalt lediglich aufgrund der Supplementierung so hohe Werte erreichte, kann davon ausgegangen werden, dass das Abwasser zu mehr als 90 % abbaubar ist.

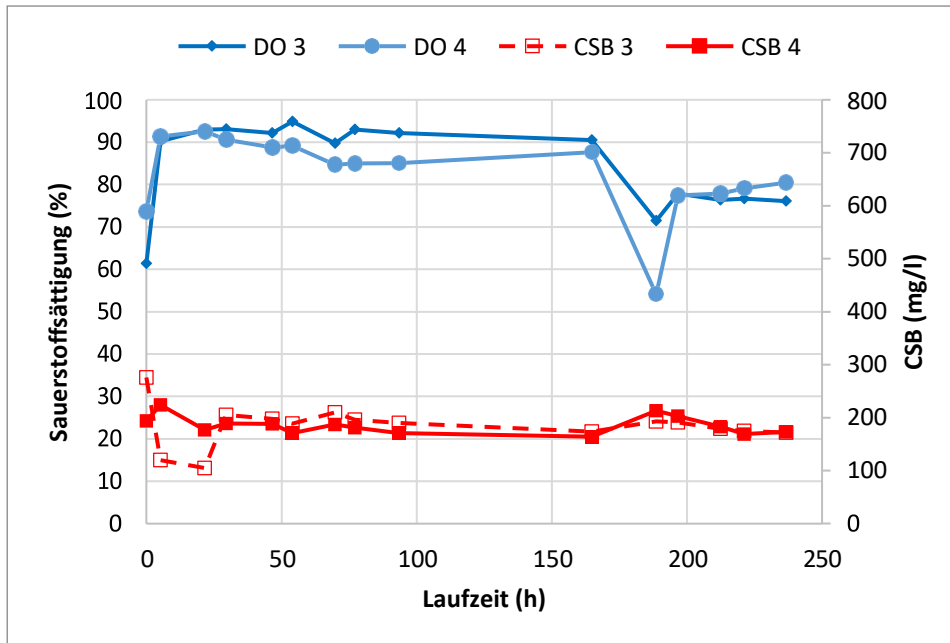


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf des Sauerstoffs sowie der CSB-Konzentration im Ablauf der beiden kontinuierlich betriebenen Reaktoren mit dem Faser-Waschwasser als Substrat.

### 3.3.4 Konzepterstellung für mögliche Verwertungswege der abgetrennten Wertstoffe

Die Faserfraktionen „Feine Faserfraktion“ und „grobe Faserfraktion“, die nicht für die Papierproduktion eingesetzt wurden, wären evtl. als Futtermittel geeignet, da die Inhaltsstoffe denjenigen von Heu unbehandelt und unfraktioniert entsprechen. Allerdings werden diese Fraktionen im technischen Betrieb einer Papierfabrik eher in flüssiger suspendierter Form gewonnen, so dass die Inhaltsstoffe dann verdünnt vorliegen und allenfalls als Zusatzstoff für Futterzwecke geeignet wären. Hier sollte eher die Formulierung eines Flüssigdüngers ins Auge gefasst werden, was aus der Literatur bekannt ist. Alternativ wäre der Einsatz als Substrat für Biogasanlagen möglich. In den vorliegenden Untersuchungen ergab sich eine Biogasausbeute für die feine Faserfraktion von  $0,3 \text{ NL/g oTR}_{\text{input}}$  und für die grobe Faserfraktion von  $0,4 \text{ NL/g oTR}_{\text{input}}$ . Außerdem wäre noch zu untersuchen, ob die Faserfraktionen als Rohstoff für die Herstellung von Faserverbundstoffen für technische Anwendungen eingesetzt werden können, wobei möglicherweise die Faserlänge, die durch den Pelletierungsvorgang vorgegeben ist, nicht ausreichend ist. Als weitere Anwendungsmöglichkeit für die Fasern sollte die Eignung als Zusatzstoff in der Herstellung von Plattenwerkstoffen, wie Faserplatten oder MDF-Produkte in der Holzverarbeitenden Industrie, geprüft werden.

### 3.4 Prozessangepasste Abwasserreinigung: Erarbeitung der Grundlagen für einen genehmigungsfähigen Prozess. Untersuchung des Einflusses der Graspapierproduktion auf die Abwasserreinigung

Beispielhaft für eine Papierfabrik, die auch Graspapier chargenweise herstellte, wurde die Abwasserreinigung dieser Papierfabrik betrachtet. Diese Papierfabrik war ein Beispiel für einen Betrieb, der die Produktion zeitweise umgestellt hatte. Die Produktionsumstellung bestand darin, dass die herkömmliche Papierproduktion durch die Produktion von Graspapier zunächst ergänzt wurde. Das bedeutet, dass alle Maschinen und der gesamte Herstellungsprozess inklusive der Abwasserreinigungsanlage, die ursprünglich für die Produktion von weißem herkömmlichen Papier ausgelegt waren, nun auch für die Produktion von Graspapier eingesetzt wurden. Deshalb wurden Untersuchungen durchgeführt hinsichtlich der Fragestellung, welche Veränderungen sich daraus für die Abwasserreinigungsanlage ergeben.

Die Abwasserreinigungsanlage der Papierfabrik war ausgelegt und angepasst an die herkömmliche Produktion von weißem Papier auf Zellstoffbasis. Um den Einfluss der Graspapierproduktion auf die Abwasserreinigung bewerten zu können, wurde der Ist-Zustand der Abwasserreinigungsanlage beispielhaft anhand der Daten der Papierfabrik erfasst und charakterisiert. Dazu wurde das Betriebstagebuch für die Jahre 2011 und 2014 ausgewertet sowie im Vergleich dazu das Betriebstagebuch für das Jahr 2017, in dem chargenweise jeweils für 1 – 2 Tage Graspapier produziert wurde.

Zusätzlich wurde der Betrieb der Abwasserreinigungsanlage durch Probenahmen an ausgewählten charakteristischen Probenahmestellen entlang der Abwasserreinigungsanlage charakterisiert.

#### 3.4.1 Auswertung des Betriebstagebuchs

Das Betriebstagebuch wurde hinsichtlich wesentlicher charakteristischer Parameter ausgewertet für die Jahre 2011 und 2014 im Vergleich zum Jahr 2017, in dem an einzelnen Tagen Graspapier produziert wurde. Die Graspapierproduktion erfolgte chargenweise jeweils für maximal 1 – 2 Tage. In Tabelle 8 sind die Zeiträume, in denen chargenweise Graspapier produziert wurde, von Dezember 2016 bis September 2017 aufgelistet.

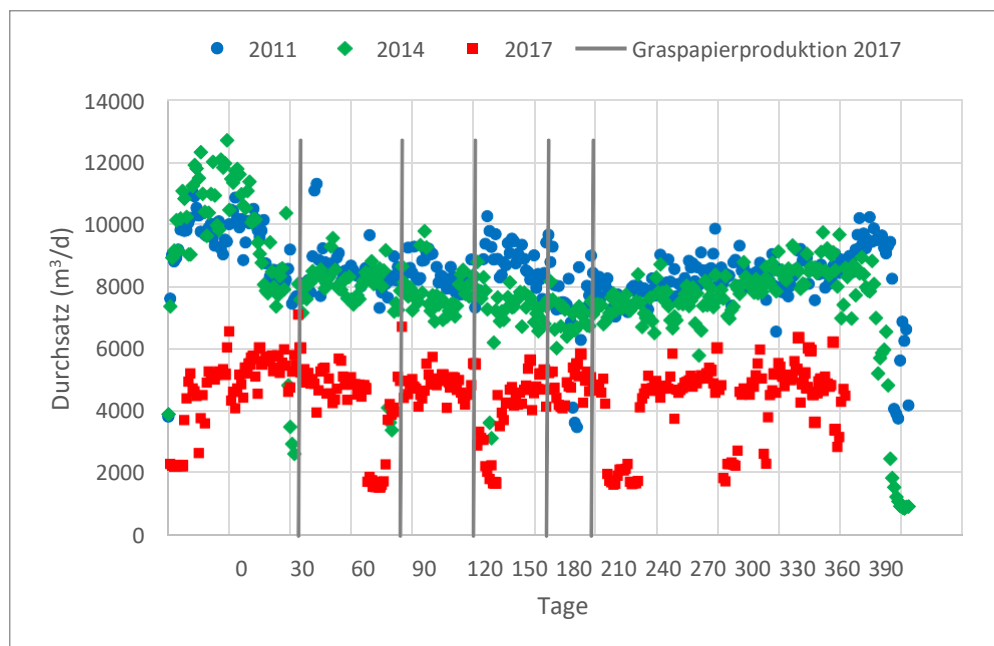
**Tabelle 8: Chargenproduktionen im Jahr 2017**

Charge Nr	Produktionsdatum Start	Produktionsdatum Ende	Produktionsdauer
1	20.12.2016, 21:00 Uhr	21.12.2016, 1:00 Uhr	4 h
2	6.3.2017, 9:30 Uhr	6.3.2017, 23:00 Uhr	13,5 h
3	25.4.2017, 15:00 Uhr	26.4.2017, 4:00 Uhr	13 h
4	31.5.2017, 10:00 Uhr	1.6.2017, 6:00 Uhr	20 h
5	6.9.2017, 10:00 Uhr	7.9.2017, 3:30 Uhr	17,5 h
6	28.9.2017, 7:30 Uhr	29.9.2017, 2:00 Uhr	18,5 h

### 3.4.1.1 Hydraulische Belastung und Einfluss der Graspapierproduktion

Die hydraulische Belastung der Abwasserreinigungsanlage ist in Abbildung 9 für die Jahre 2011, 2014 und 2017 dargestellt. Es zeigte sich, dass die Verläufe der Tagesdurchsätze unterschiedlich waren. In 2011 und 2014 ergaben sich kontinuierlich verlaufende Tagesdurchsätze im Verlauf des Jahres, die ähnlichen Verlauf zeigten. Man erkennt für den Beginn der Jahre 2011 und 2014 jeweils über einen Zeitraum von etwa 40 Tagen ein maximales Abwasseraufkommen, das in 2011 zwischen etwa 9500 m<sup>3</sup>/d und 11000 m<sup>3</sup>/d und in 2014 bei etwa zwischen 10 000 m<sup>3</sup>/d und 12000 m<sup>3</sup>/d lag. Im weiteren Verlauf des Jahres ging der Tagesdurchsatz tendenziell zurück bis zur Jahresmitte. Danach zeigte der zeitliche Verlauf einen allmählichen Anstieg des Abwasseraufkommens bis zum Jahresende. Für die letzten 10- 15 Tage der Jahre 2011 und 2014 ist jeweils ein deutlicher Abfall des Abwasseraufkommens von etwa 9500 m<sup>3</sup>/d (2011) bzw. etwa 8500 m<sup>3</sup>/d (2014) auf etwa 4000 m<sup>3</sup>/d (2011) bzw. etwa 1000 m<sup>3</sup>/d (2014) zu erkennen.

Die beiden Jahre 2011 und 2014 unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Extremwerte. Im Jahr 2014 lag der Tagesdurchsatz zwischen etwa 1000 m<sup>3</sup>/d und etwa 12 000 m<sup>3</sup>/d, wobei an etwa 300 Tagen im Jahr der Tagesdurchsatz zwischen 6500 m<sup>3</sup>/d und etwa 10 000 m<sup>3</sup>/d lag (Abbildung 10). Im Jahr 2011 dagegen lag der Tagesdurchsatz zwischen 3500 m<sup>3</sup>/d und etwa 11 500 m<sup>3</sup>/d, wobei er an etwa 300 Tagen des Jahres zwischen 7500 m<sup>3</sup>/d und 10000 m<sup>3</sup>/d lag. Im Jahr 2014 waren die Unterschiede im Tagesdurchsatz also insgesamt größer als im Jahr 2011 (Abbildung 10).



**Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf des täglichen, hydraulischen Durchsatzes durch die Abwasserreinigungsanlage vom 1. Januar eines Jahres (0 d) bis zum 31. Dezember (365 d) für die Jahre 2011, 2014 und 2017, sowie die Zeitpunkte der Graspapierproduktion.**

## Einfluss der Graspapierproduktion auf den hydraulischen Tagesdurchsatz

Eingehender Bericht über die  
einzelnen Arbeitspakete

Für das Jahr 2017 jedoch ergab sich ein deutlich anderes Bild für den zeitlichen Verlauf des Tagesdurchsatzes. Der Verlauf ist diskontinuierlich. Es sind im Wesentlichen zwei Zustände zu erkennen. Der Tagesdurchsatz lag meist entweder zwischen etwa 4500 m<sup>3</sup>/d und 6000 m<sup>3</sup>/d oder bei etwa 2000 m<sup>3</sup>/d. Die Tagesdurchsätze von etwa 2000 m<sup>3</sup>/d stellten sich meist sprunghaft ein und stiegen meist sprunghaft wieder auf Werte von 4000 m<sup>3</sup>/d bis 6000 m<sup>3</sup>/d an.

Für die ersten drei Chargen der Graspapierproduktion ist jeweils am Tag der Graspapierproduktion ein kurzzeitiger, gegenüber dem Vortag jeweils sprunghafter Anstieg des Tagesdurchsatzes zu erkennen.

Es zeigte sich auch, dass der Tagesdurchsatz im Jahr 2017 deutlich unter den Tagesdurchflüssen von den Jahren 2011 und 2014 lagen. Wie in Abbildung 9 auch ersichtlich wird, lässt sich kein Zusammenhang zwischen den sprunghaften, dann aber einige Tage andauernden geringen Tagesdurchsätzen von etwa 2000 m<sup>3</sup>/d erkennen. Vielmehr sind die geringen Tagesdurchsätze darauf zurückzuführen, dass während dieser Zeiträume überhaupt keine Papierproduktion erfolgte. Der Tagesdurchsatz an den Tagen ohne Papierproduktion ist größtenteils durch Fremdwasser verursacht.

In Abbildung 10 sind die Tagesdurchsätze aufsteigend sortiert dargestellt. Auch hier ist ersichtlich, dass im Jahr 2011 für die überwiegende Anzahl der Tage die Tagesdurchsätze im Vergleich mit 2014 und 2017 höher lagen. Im Jahr 2011 lag der Tagesdurchsatz meist zwischen 8000 m<sup>3</sup>/d und 10 000 m<sup>3</sup>/d, im Jahr 2014 zwischen 6500 m<sup>3</sup>/d und 8500 m<sup>3</sup>/d und im Jahr 2017 nur zwischen 4000 m<sup>3</sup>/d und 6000 m<sup>3</sup>/d.

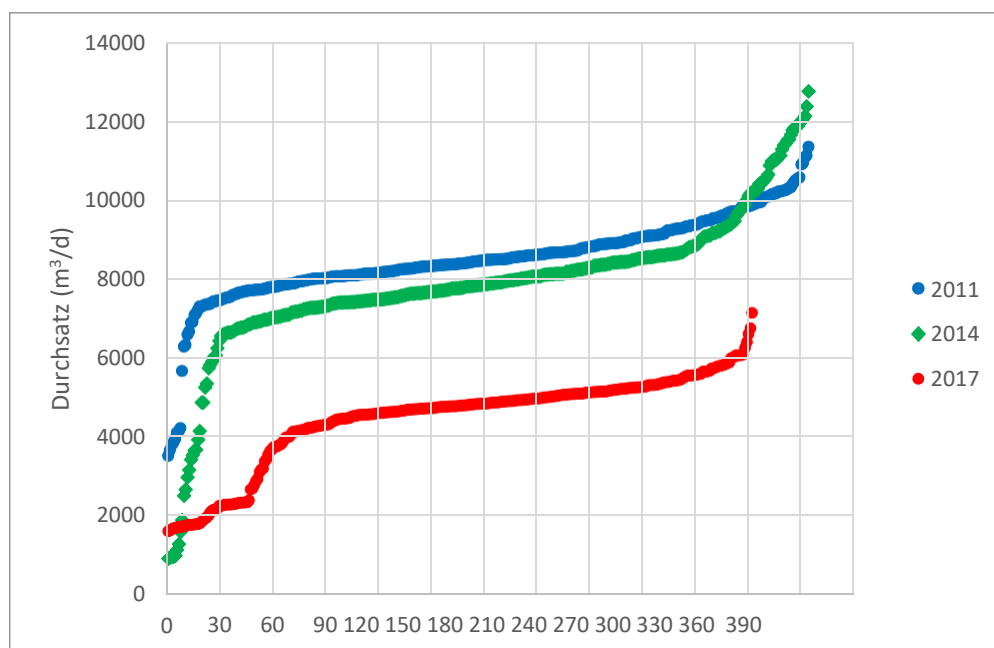
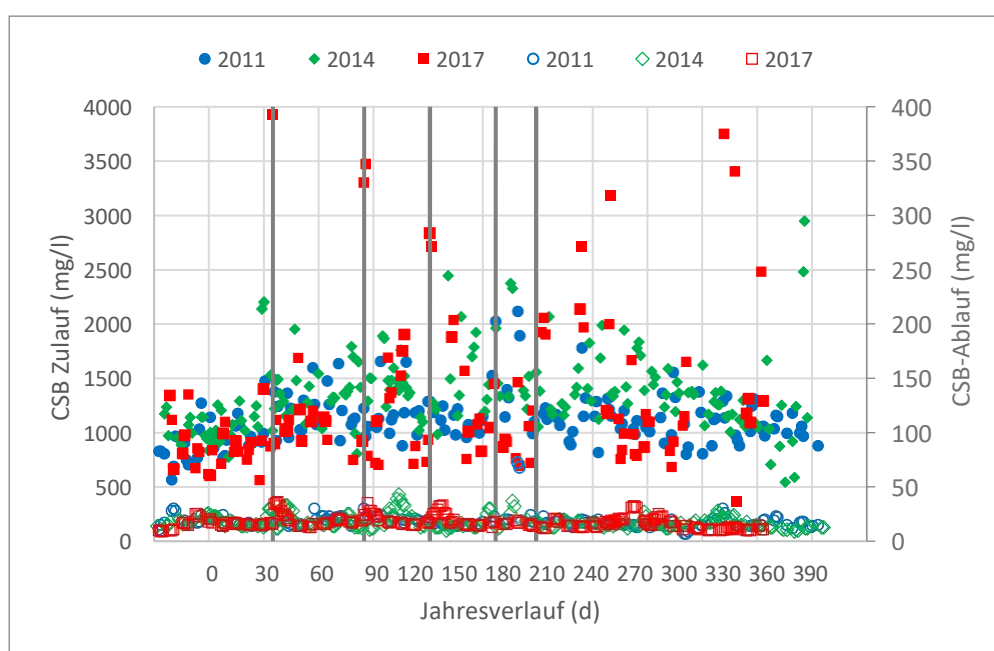


Abbildung 10: Täglicher hydraulischer Durchsatz durch die Abwasserreinigungsanlage, aufsteigend sortiert, für die Jahre 2011, 2014 und 2017.

### 3.4.1.2 CSB-Konzentration und Einfluss der Graspapierproduktion

In Abbildung 11 ist der zeitliche Verlauf der CSB-Konzentration im Zu- und Ablauf der Kläranlage für die Jahre 2011, 2014 und 2017 dargestellt. Die Zulaufkonzentrationen in den Jahren 2011 und 2014 lagen meist zwischen etwa 1000 mg/l und 1500 mg/l. Für 2014 zeigte es sich, dass jeweils zu Beginn des Jahres die Werte im Zulauf tendenziell geringer waren als im weiteren Verlauf bis zur Jahresmitte. Zu Beginn des Jahres zeigten die Tageswerte auch geringere Unterschiede und Schwankungen und lagen etwa zwischen 800 mg/l und 1300 mg/l. Trotz der unterschiedlich hohen Zulaufkonzentrationen, die meist zwischen 700 und 2000 mg/l lagen, lag die CSB-Konzentration im Ablauf meist bei etwa 20 mg/l. Es gab wenige Ausnahmen, an denen ein Anstieg der CSB-Konzentration auf maximal 39 mg/l im Ablauf zu verzeichnen war. Diese traten jedoch sowohl in den Jahren 2011 und 2014 als auch 2017 auf. Die CSB-Werte im Ablauf lagen jedoch für alle drei Jahre ganzjährig unterhalb des Grenzwerts von 40 mg/l.



**Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der CSB-Konzentration im Zulauf (ausgefüllte Symbole) und Ablauf (offene Symbole) der Abwasserreinigungsanlage vom 1. Januar eines Jahres (0 d) bis zum 31. Dezember (365 d) für die Jahre 2011, 2014 und 2017, sowie die Zeitpunkte der Graspapierproduktion.**

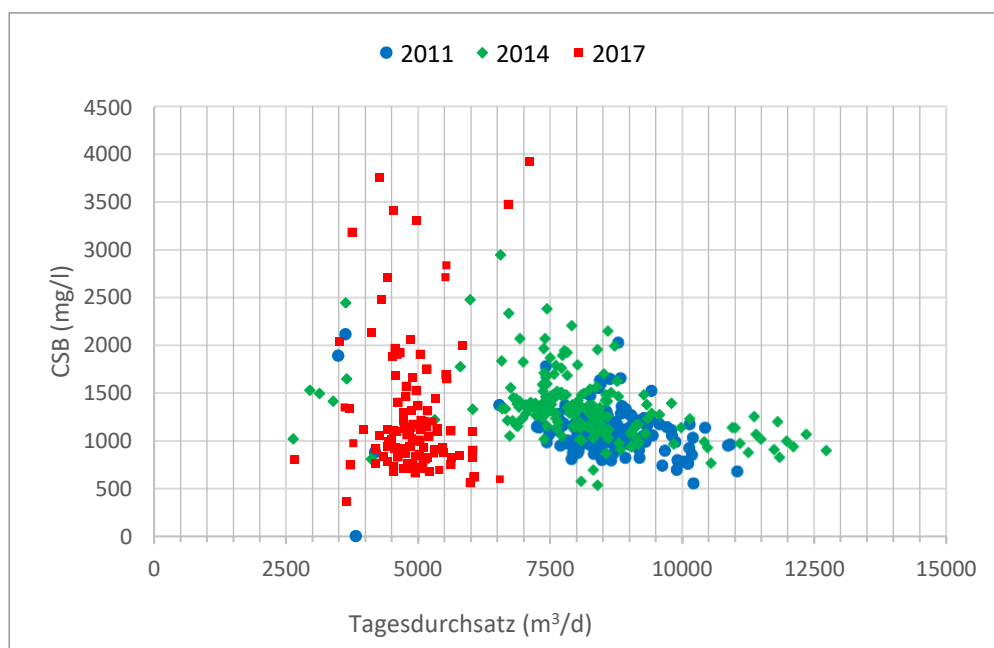
### Einfluss der Graspapierproduktion auf die CSB-Konzentration

Es zeigte sich, dass die höchsten CSB-Konzentrationen im Zulauf im Jahr 2017 auftraten mit Werten von bis zu 4000 mg/l. Die Werte wurden an den Tagen gemessen, als die Produktion von Graspapier stattfand. Allerdings sind während der Produktions-Chargen, die bei Tag 188 und Tag 210 erfolgten, keine Spitzen für die CSB-Konzentrationen im Zulauf ersichtlich. Dies lag daran, dass für diese beiden Tage keine CSB-Werte für den Zulauf vorlagen. Für den weiteren Verlauf des Jahres nach Tag 210 liegen außerdem keine Informationen zur Graspapierproduktion vor. Das bedeutet, dass die im weiteren Verlauf des Jahres auftretenden CSB-Spitzen im Zulauf möglicherweise durch Graspapierproduktion verursacht wurden (Abbildung 11).



Im Ablauf waren jeweils nach den Tagen der Graspapierproduktion etwas erhöhte CSB-Konzentrationen von bis zu maximal 35 mg/l zu verzeichnen. Die CSB-Konzentration im Ablauf lag an den übrigen Tagen des Jahres 2017 meist unter 20 mg/l.

In Abbildung 12 ist die CSB-Konzentration im Zulauf als Funktion des Tagesdurchsatzes dargestellt für die Jahre 2011, 2014 und 2017. Für die Jahre 2011 und 2014 zeigte sich tendenziell ein Rückgang der CSB-Konzentration im Zulauf mit steigendem Tagesdurchsatz. Für das Jahr 2017 konnte diese Tendenz nicht festgestellt werden. Insgesamt lagen die Tagesdurchsätze wie schon in Abbildung 10 dargestellt, meist deutlich unterhalb der in 2011 und 2014 aufgetretenen Tagesdurchsätze, allerdings mit z. T. deutlich höheren CSB-Konzentrationen. Es zeigte sich also, dass die Graspapierproduktion deutlichen Einfluss auf die CSB-Konzentration im Zulauf zeigte. Die höchsten CSB-Werte lagen bei etwa 4000 mg/l. Auch auf den Ablauf der CSB-Konzentration konnte ein Einfluss festgestellt werden. Es traten CSB-Konzentrationen von maximal 35 mg/l auf.



**Abbildung 12: CSB-Zulaufkonzentration als Funktion des Tagesdurchsatzes für die Jahre 2011, 2014, 2017.**

### 3.4.1.3 CSB-Fracht im Zulauf und Einfluss der Graspapierproduktion

In Abbildung 13 ist der zeitliche Verlauf der CSB-Fracht im Zulauf für die Jahre 2011, 2014 und 2017 dargestellt. In Abbildung 14 ist die tägliche CSB-Fracht aufsteigend sortiert dargestellt, jeweils für die Jahre 2011, 2014 und 2017. Es zeigte sich, dass die täglichen CSB-Frachten im Zulauf in den Jahren 2011 und 2014 meist bei etwa 5 t/d bis 15 t/d lagen. Im Jahr 2014 lag die tägliche CSB-Fracht im Zulauf zwar etwas höher als im Jahr 2011, aber die Unterschiede in den CSB-Frachten lagen bei etwa 1 t/d. Im Jahr 2017 lag die CSB-Fracht meist zwischen 3 und 10 t/d.

#### Einfluss der Graspapierproduktion auf die CSB-Fracht

Die Graspapierproduktion in 2017 zeigte deutlichen Einfluss auf die tägliche CSB-Fracht. An den Tagen, an denen Graspapier produziert wurde und auch die CSB-

Konzentrationen vorlagen, konnte ein deutlicher Anstieg der CSB-Fracht im Zulauf auf Werte zwischen 15 t/d und 28 t/d verzeichnet werden. An den Tagen, an denen keine Graspapierproduktion stattfand, lag die CSB-Fracht im Zulauf der Abwasserreinigungsanlage meist zwischen 3 t/d und 10 t/d. Allerdings gab es auch einzelne Werte, die bis zu 28 t/d anstiegen.

Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete

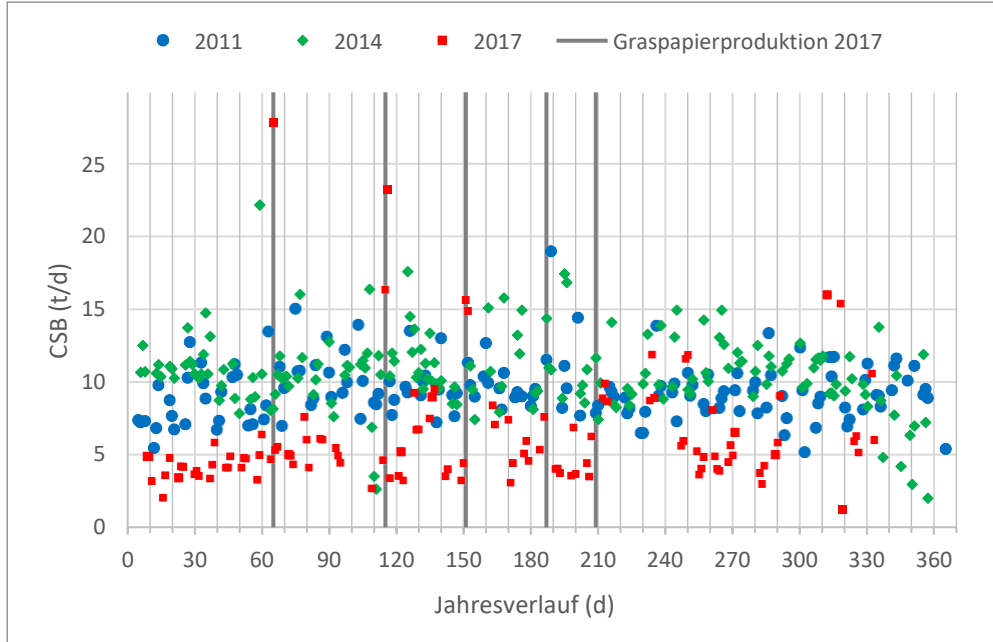


Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf der CSB-Fracht im Zulauf der Abwasserreinigungsanlage vom 1. Januar eines Jahres (0 d) bis zum 31. Dezember (365 d) für die Jahre 2011, 2014 und 2017, sowie die Zeitpunkte der Graspapierproduktion.

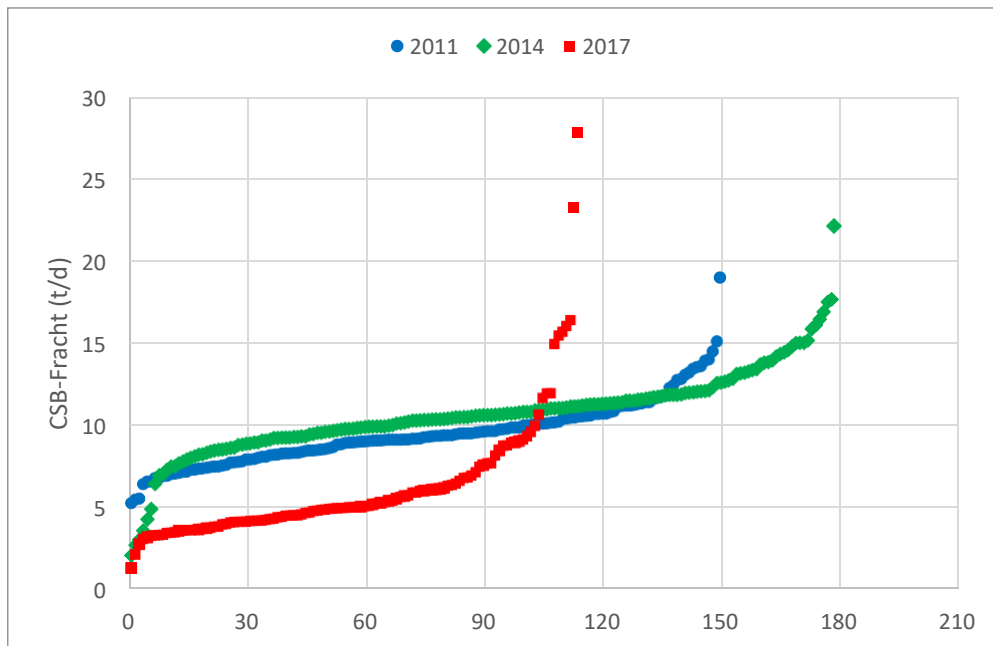


Abbildung 14: Tägliche CSB-Fracht im Zulauf der Abwasserreinigungsanlage aufsteigend sortiert, für die Jahre 2011, 2014 und 2017.

### 3.4.1.4 Spezifisches Abwasseraufkommen und Einfluss der Graspapierproduktion

In Abbildung 15 ist der zeitliche Verlauf des Abwasseraufkommens pro Tonne Papier dargestellt für die Jahre 2011, 2014 und 2017. Für die Jahre 2011 und 2014 zeigte sich eine Grundlinie von etwa 8000 bis 10000 l/t Papier, wobei es auch Tage mit höherem spezifischem Abwasseraufkommen gab. Im Jahr 2017 war eine solche Grundlinie nicht zu erkennen. Es zeigte sich, dass das spezifische Abwasseraufkommen an Tagen der Graspapierproduktion auf über 20 000 l/t Papier anstieg.

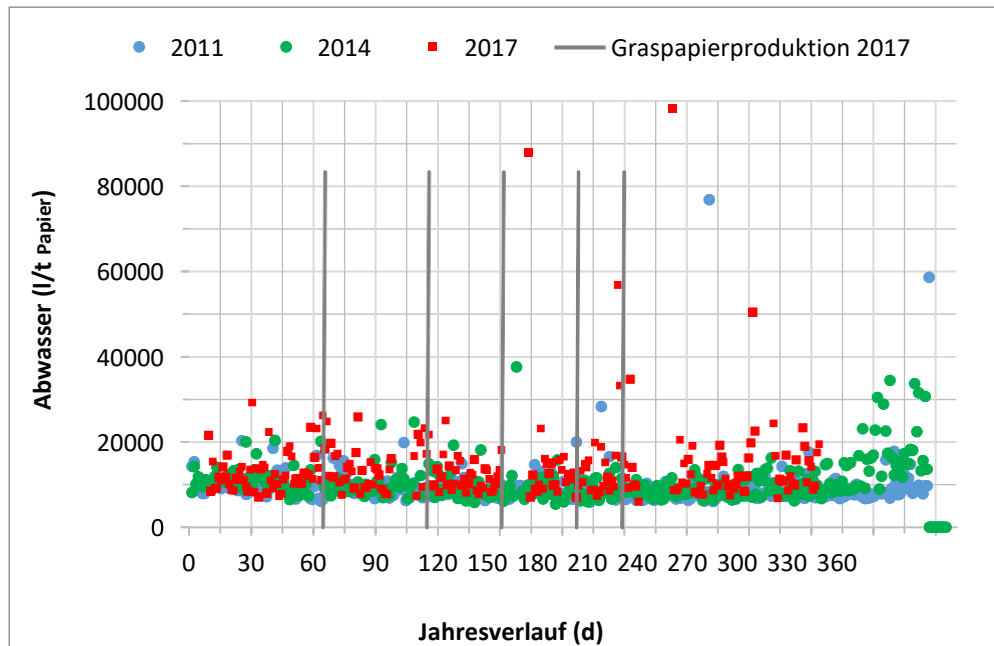
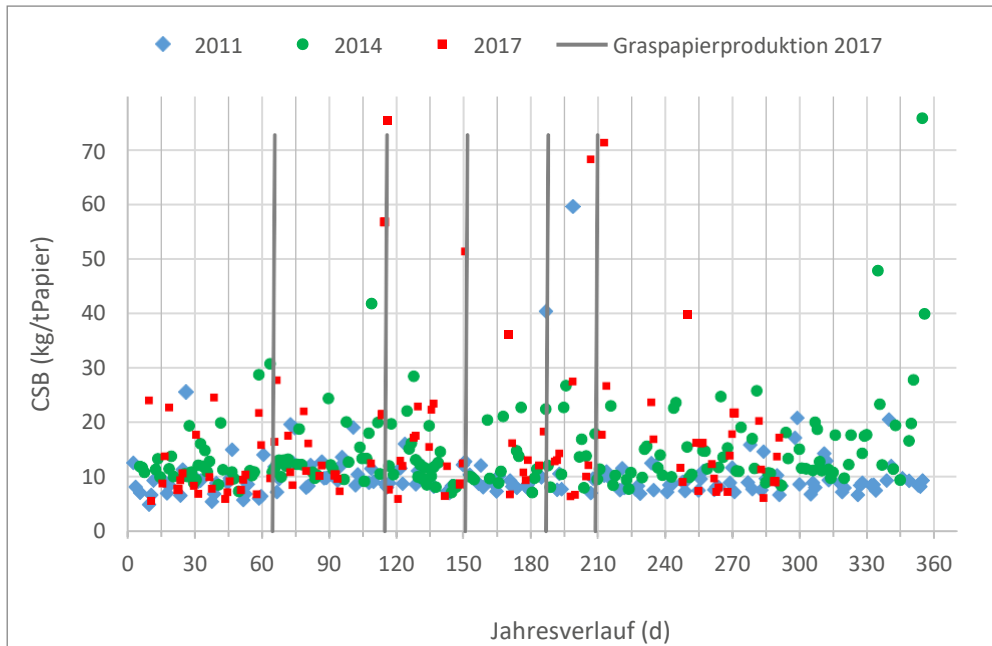


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf des spezifischen Abwasseraufkommens bei der Papierproduktion vom 1. Januar eines Jahres (0 d) bis zum 31. Dezember (365 d) für die Jahre 2011, 2014 und 2017.

### 3.4.1.5 Spezifische CSB-Fracht und Einfluss der Graspapierproduktion

In Abbildung 16 ist der zeitliche Verlauf der spezifischen CSB-Fracht in kg CSB pro Tonne produziertem Papier im Verlauf des Jahres für die Jahre 2011, 2014 und 2017 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass während des ganzen Jahres die Werte meist bei etwa 10 kg CSB pro Tonne Papier liegen. Die Werte streuen ganzjährig auch nach oben und lagen dann bis auf wenige Ausnahmen bei maximal 30 kg CSB/t Papier. Einzelne höhere Werte traten in allen drei betrachteten Jahren auf. Es zeigte sich allerdings, dass im Jahr 2017 die höchsten Werte von etwa 70 bzw. 75 kg/t Papier mit den Zeitpunkten der Graspapierproduktion korrelierten. Das bedeutet, dass auch in den Jahren 2011 und 2014 vor der Graspapierproduktion vereinzelt schon vergleichbar hohe Werte aufgetreten sind. Im Jahr 2017 sind die höchsten Werte jedoch eindeutig der Graspapierproduktion zuzuordnen.



**Abbildung 16: Zeitlicher Verlauf der spezifischen CSB-Fracht bei der Papierproduktion vom 1. Januar eines Jahres (0 d) bis zum 31. Dezember (365 d) für die Jahre 2011, 2014 und 2017. Eingezeichnet sind auch die Zeitpunkte der Graspapierproduktion im Jahr 2017 (graue Markierung).**

### 3.4.2 Probenahme während der Graspapierproduktion

Um die Abwasserreinigung zu charakterisieren, wurden entlang der Abwasserreinigung an zuvor ausgewählten, charakteristischen Stellen Proben entnommen und analysiert. So konnte der Betrieb der ursprünglich für die herkömmliche Papierproduktion ausgelegten Kläranlage hinsichtlich ausgewählter Parameter (z. B. pH-Wert, Temperatur, TR, oTR, CSB, DOC, TN, Nges, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, Sauerstoff im Belebungsbecken) analysiert werden.

#### 3.4.2.1 Beschreibung der Abwasserreinigung

Das Abwasser aus der Papierproduktion gelangt nach der mechanischen Reinigung durch Rechen (Spaltenweite 0,6 cm) und Sandfang in den Accelator: Hier erfolgt die Abtrennung von Feststoffen, die nach weiterer Eindickung und Zentrifugation als Schlamm im Ofen verbrannt werden. Die Verbrennung im firmeneigenen Ofen erfolgte u.a. aus Gründen der Entsorgungssicherheit. Das so von Feststoffen bereinigte Abwasser wurde in einen 1500 m<sup>3</sup> fassenden Pufferturm geführt. Bei Bedarf, bzw. bei gefülltem Pufferturm gibt es die Möglichkeit, das Abwasser an dem Pufferturm vorbeizuleiten. Das Abwasser gelangt so in die Belebung. Diese besteht aus zwei parallelen Straßen, jede Straße aus vier nacheinander geschalteten Becken. Die Belüftung der Belebungsbecken erfolgt jeweils mithilfe am Boden liegender Belüftermatten, wobei das erste Becken jeder Straße die höchste Mattendichte aufwies. Das bedeutet, dass dort, wo die höchste Schmutz-Konzentration vorliegt, die maximale Sauerstoffversorgung möglich ist. Die Aufteilung des Abwassers auf die beiden Straßen erfolgt mithilfe einer senkrecht in der Strömung stehenden Trennplatte, deren exakte Position flexibel einstellbar ist. So wird das Abwasser, an den beiden Seiten der Trennwand entlang fließend, auf die beiden Straßen aufgeteilt. Eine Überprüfung

hinsichtlich der ausgewogenen Teilung durch Messung des Durchsatzes der beiden Straßen erfolgte nicht. Die Belebung hatte insgesamt ein Volumen von 5600 m<sup>3</sup>, die sich anschließende Nachklärung ein Volumen von 5200 m<sup>3</sup>. Das Abwasser wurde nach der Nachklärung in drei in Reihe angelegte Seen geleitet, deren Volumina nacheinander bei 5300 m<sup>3</sup>, 10100 m<sup>3</sup> sowie 9200 m<sup>3</sup> lagen. Von dort erfolgte die Einleitung in den Vorfluter.

Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete

### 3.4.2.2 Festlegung der Probenahmestellen und Probenahmen

In Abbildung 17 sind die Probenahmestellen, die dazu geeignet sind, die Abwasserreinigungsanlage vom Zulauf bis zum Ablauf in den Vorfluter zu beschreiben, in das Schema der Abwasserreinigungsanlage eingezeichnet. In Tabelle 9 sind die Probenahmestellen aufgelistet.

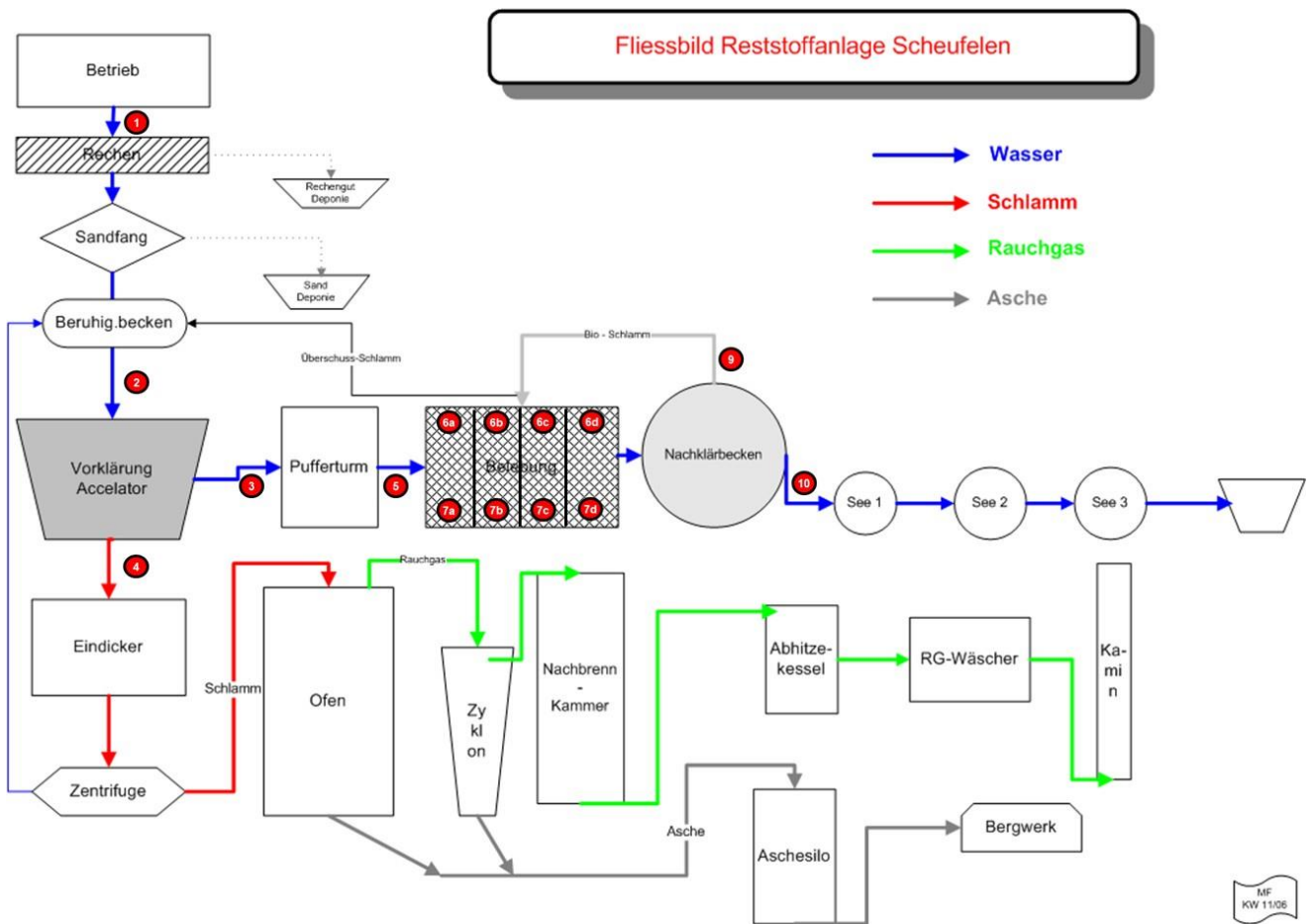


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Abwasserreinigungsanlage mit Festlegung der Probenahmestellen (nach Papierfabrik, ergänzt).

**Tabelle 9: Probenahmestellen während Chargenproduktion A**

-----  
Eingehender Bericht über die  
einzelnen Arbeitspakete  
-----

Nr.	Probenplan	Nr.	Probenplan
1	vor dem Rechen	6d	Straße 1: 4. Becken
2	vor dem Accelator	7a	Straße 2: 1. Becken
3	nach dem Accelator	7b	Straße 2: 2. Becken
4	Zulauf Zentrifuge	7c	Straße 2: 3. Becken
5	Zulauf Belebung	7d	Straße 2: 4. Becken
6a	Straße 1: 1. Becken	8	Zulauf Nachklärung
6b	Straße 1: 2. Becken	9	Rücklaufschlamm
6c	Straße 1: 3. Becken	10	Ablauf Nachklärung

Während der Graspapierproduktion erfolgten die Probenahmen jeweils an zwei Tagen während der Produktion von zwei verschiedenen Chargen Graspapier. Die beiden Beprobungen erfolgten mit einem zeitlichen Abstand von 7 Monaten.

### **Probenahme während Chargenproduktion A**

Die Papierproduktion startete am Tag 1 um 10:30 Uhr. Insgesamt wurden zu vier verschiedenen Zeitpunkten PN1 bis PN4 Proben entnommen. Die Probenahme erfolgte an allen vier Probenahmezeitpunkten von Probe 1 bis Probe 10, entsprechend Tabelle 9.

Die erste Probenahme aus der Abwasserreinigungsanlage begann mit der Probenahme 1 (PN1) um 8:50 Uhr an Tag 1 an der Probenahmestelle 1 und dauerte bis 10:00 Uhr an der Probenahmestelle 10. Die Beprobung fand vor dem Beginn der Graspapierproduktion statt.

Die zweite Probenahme (PN2) aus der Abwasserreinigungsanlage begann am Tag 1 mit der ersten Probenahme um 15:35 Uhr an der Probenahmestelle 1 und dauerte bis 16:40 Uhr an der Probenahmestelle 10. Außerdem wurde aus den Abläufen der parallelen Belebungsstraßen jeweils um 23:20 an Tag 1 eine Probe gezogen (Proben 6d und 7d).

Die dritte Probenahme (PN3) aus der Abwasserreinigungsanlage begann an Tag 2 um 9:23 Uhr an der Probenahmestelle 1 und dauerte bis 10:21 Uhr an der Probenahmestelle 10.

Die vierte Probenahme (PN4) aus der Abwasserreinigungsanlage begann an Tag 2 um 11:43 Uhr an der Probenahmestelle 1 und dauerte bis 12:45 Uhr an der Probenahmestelle 10.

An Tag 2 der Graspapierproduktion wurde um 10:30 Uhr, also nach der PN3, der Schieber zur Verteilung des Abwassers auf die beiden Straßen der Belebung 1 und 2 zugunsten von Straße 1 geändert und neu eingestellt. Außerdem wurde am Tag 2 um 8:50 Uhr, also vor der PN3, alle Klappen der Belüftung geöffnet, so dass die Sauerstoffzufuhr maximal war.

## Probenahme während Chargenproduktion B

-----  
Eingehender Bericht über die  
einzelnen Arbeitspakete  
-----

Die Papierproduktion startete am Tag 1 und dauerte, mit Unterbrechungen, bis Tag 6. Insgesamt wurden zu vier verschiedenen Zeitpunkten PN1 bis PN4 Proben entnommen. Die Probenahme erfolgte an allen vier Probenahmezeitpunkten jeweils an acht verschiedenen Probenahmestellen, die in Tabelle 10 zusammengefasst sind. Die Probenahme während der Produktion der Charge B erfolgte nach den Vorgaben und nach Anleitung von Fraunhofer IGB durch das Betriebspersonal der Abwasserreinigungsanlage. Die Proben sollten unmittelbar nach der Entnahme filtriert und kühl gestellt werden.

Die erste Probenahme aus der Abwasserreinigungsanlage begann mit der Probenahme 3 (PN3) um 14:30 Uhr an Tag 1 an der Probenahmestelle 3 und dauerte bis 15:15 Uhr an der Probenahmestelle 10.

Die zweite Probenahme (PN2) aus der Abwasserreinigungsanlage begann am Tag 2 mit der ersten Probenahme um 8:45 Uhr an der Probenahmestelle 3 und dauerte bis 9:15 Uhr an der Probenahmestelle 10.

Die dritte Probenahme (PN3) aus der Abwasserreinigungsanlage begann an Tag 6 um 11:28 Uhr an der Probenahmestelle 3 und dauerte bis 11:58 Uhr an der Probenahmestelle 10.

Die vierte Probenahme (PN4) aus der Abwasserreinigungsanlage begann ebenfalls an Tag 6 um 16:05 Uhr an der Probenahmestelle 3 und dauerte bis 16:30 Uhr an der Probenahmestelle 10.

**Tabelle 10: Probenahmestellen während Chargenproduktion B**

Nr.	Probenplan	Nr.	Probenplan
3	nach dem Accelator	7a	Straße 2: 1. Becken
5	Zulauf Belebung	7d	Straße 2: 4. Becken
6a	Straße 1: 1. Becken	8	Zulauf Nachklärung
6d	Straße 1: 4. Becken	10	Ablauf Nachklärung

### 3.4.2.3 Ergebnisse der Beprobung der Abwasserreinigung während der Graspapierproduktion Charge A

#### Vergleich der beiden Belebungsstraßen während der Produktion von Charge A

In Abbildung 18 ist die Sauerstoffkonzentration an den vier Messstellen a, b, c und d in den beiden Belebungsstraßen vergleichend für die vier Probenahmezeitpunkte dargestellt. Es zeigte sich, dass die Sauerstoffkonzentration an den beiden ersten Messungen PN1 und PN2 in beiden Straßen an den beiden ersten Probenahmepunkten a und b jeweils zwischen etwa 5 mg/l und 6 mg/l lag und damit in beiden Becken vergleichsweise hohe Werte erreichte. An den Probenahmestellen c und d lag die Sauerstoffkonzentration an den beiden ersten Messungen PN1 und PN2 in beiden Straßen mit 4,3 mg/l bis 5,5 mg/l etwas niedriger. Sie erreichte damit in beiden Becken

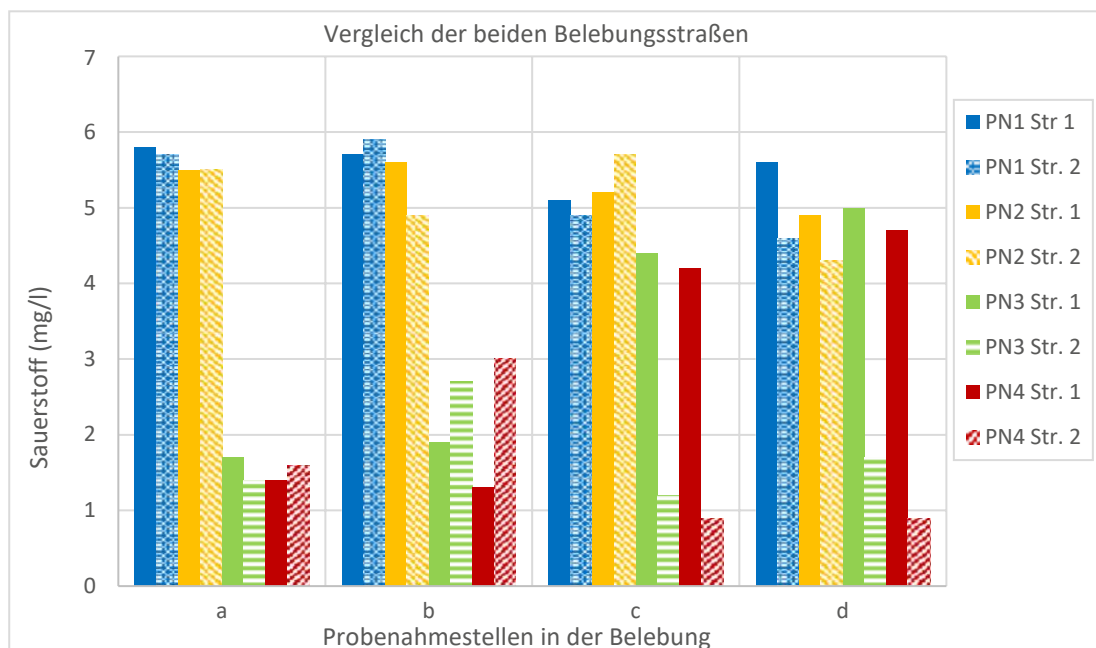


vergleichsweise hohe Werte. Daran zeigte sich, dass das Abwasser zum Zeitpunkt der zweiten Probenahme PN2 noch nicht im Belebungsbecken angekommen war.

Die Sauerstoffkonzentration an den Messstellen a lag bei der PN3 und bei der PN4 mit 1,4 mg/l bis 1,7 mg/l in beiden Straßen deutlich niedriger. Es ergab sich auch zu den Zeitpunkten kein Unterschied für die Sauerstoffkonzentration an den beiden parallelen Messstellen. Für die Messstellen c und d jedoch ergaben sich für die beiden Straßen unterschiedliche Messwerte für die Messzeitpunkte PN3 und PN4. In der Straße 1 war die Sauerstoffkonzentration vergleichsweise hoch und lag an beiden Messstellen c und d an den beiden letzten Messungen PN3 und PN4 zwischen 4 mg/l und 5 mg/l. In Straße 2 lag zu diesen beiden Zeitpunkten PN3 und PN4 eine deutlich niedrigere Sauerstoffkonzentration vor. Die letzte Messung PN4 ergab an den beiden Messstellen c und d jeweils eine Sauerstoffkonzentration von nur noch 0,9 mg/l.

Nach Aussagen der Anlagenbetreiber wurden die Schlauchmatten in Straße 1 vor kurzem ausgetauscht und sind deshalb neu und damit voll funktionsfähig. Dies könnte der Grund dafür sein, dass bei gleicher Belüftungseinstellung die Sauerstoffkonzentration am Ende der Straße deutlich höher war als in Straße 2.

Es zeigte sich, dass die Sauerstoffkonzentration zu jedem Zeitpunkt in nachweisbarer Konzentration vorlag. Eine Sauerstofflimitierung lag zu keinem Zeitpunkt vor. Die Sauerstoffzehrung war damit deutlich geringer als der Sauerstoffeintrag. Eine Überlastung der Kläranlage konnte hier nicht nachgewiesen werden.

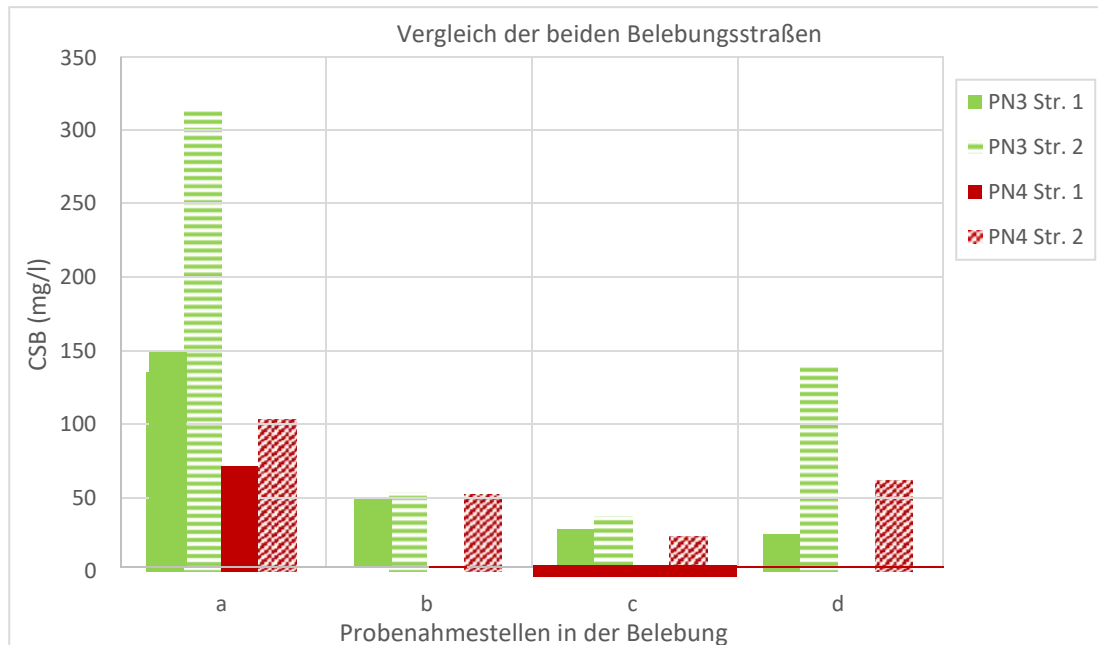


**Abbildung 18: Sauerstoffkonzentration an vier Messstellen zu vier Messzeitpunkten PN1, PN2, PN3 und PN4 entlang der Belebung in der Straße 1 und der Straße 2 im Vergleich**

In Abbildung 19 ist die CSB-Konzentration an den Probenahmestellen 6a bis 6d sowie 7a bis 7d im Vergleich dargestellt für die Probenahme 3 und Probenahme 4. Es zeigte sich, dass Straße 2 stärker belastet war als Straße 1: Die CSB-Konzentration lag an der Probenahmestelle a bei der PN3 bei 310 mg/l und war damit höher als in Straße 2. Dasselbe galt auch für die PN4. Die Werte gingen entlang der Belebung in beiden Becken zurück. Allerdings waren die CSB-Konzentrationen in Straße 2 bis zum Auslauf



höher als in Straße 1. Dies lässt den Schluss zu, dass Straße 2 höher belastet war als Straße 1. Es wäre wünschenswert, dass die Aufteilung des Abwassers auf die beiden Straßen nachweisbar je zu etwa 50 % erfolgt.

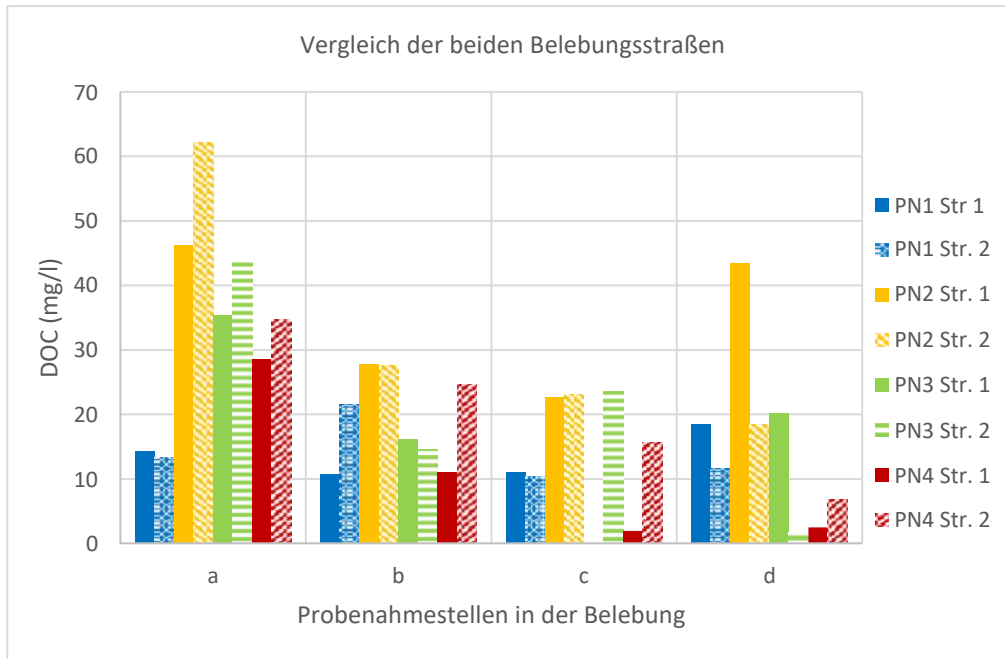


**Abbildung 19: CSB an vier Messstellen entlang der Belegung in der Straße 1 und der Straße 2 im Vergleich.**

In Abbildung 20 ist die Kohlenstoff-Konzentration (DOC Dissolved organic carbon) an den Probenahmestellen 6a bis 6d sowie 7a bis 7d im Vergleich dargestellt für die Probenahme 1 bis Probenahme 4.

Wie Abbildung 20 zeigt, sind die Zulaufkonzentrationen in Straße 1 und Straße 2 bei der ersten Probenahme, die noch vor dem Start der Graspapierproduktion stattfand, etwa gleich, mit etwa 14 mg/l DOC vergleichsweise gering. Die Zulaufkonzentrationen stiegen mit der zweiten Probenahme an auf 46 mg/l DOC in Straße 1 und 62 mg/l DOC in Straße 2, jeweils gemessen an der ersten Probenahmestelle 6a bzw. 7a der jeweiligen Straße. Es zeigte sich auch hier, dass Straße 2 stärker belastet war als Straße 1: Die Proben a zeigten in Straße 2 höhere DOC-Konzentrationen als in Straße 1. Auch bei den PN3 und PN4 wurden für Straße 2 höhere Zulaufwerte festgestellt als in Straße 1. Da die Aufteilung des Abwassers durch den Schieber nach der PN 3 geändert wurde, um etwas mehr Abwasser in Straße 1 zu lenken, sollte die Zulaufkonzentration in Straße 1 bei der PN 4 etwas höher sein. Dies ist jedoch nicht zu erkennen. Möglicherweise war das Abwasseraufkommen immer noch ungleich verteilt, so dass mehr Abwasser auf Straße 2 traf.

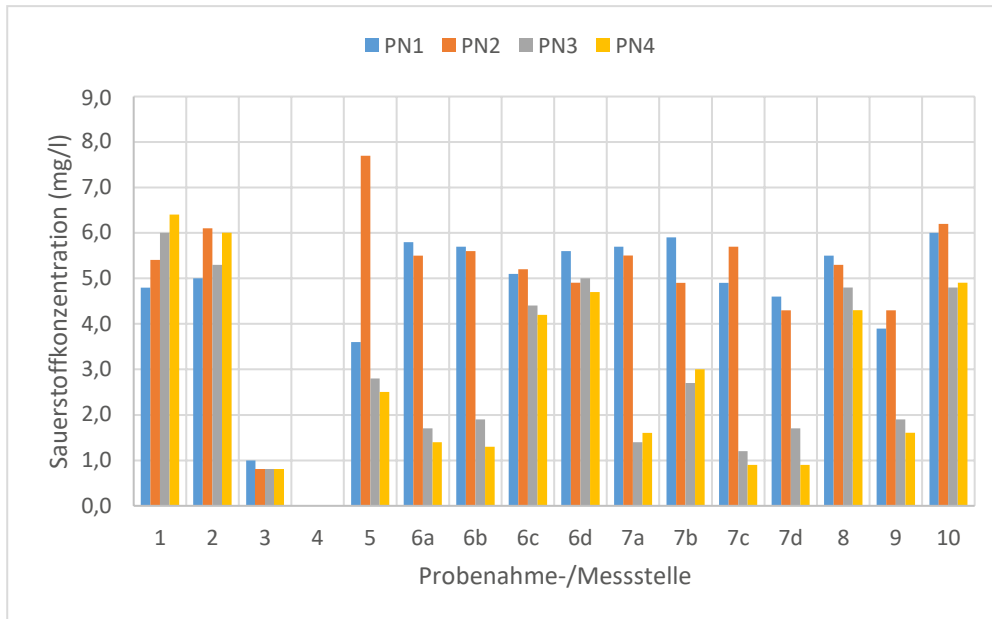
Außerdem nahm im Verlauf der Probenahme 1 bis Probenahme 4 die Konzentration in der Probe a ab. Im weiteren Verlauf ging die DOC-Konzentration bis zur Probe d für alle vier Probenahmezeitpunkte PN1 – PN4 zurück auf unter 20 mg/l. (Es zeigte sich eine Ausnahme: Probe d bei der PN2 in Straße 1: möglicherweise lag hier eine Verunreinigung der Probe vor, oder ein Messfehler. Die Messung konnte leider nicht wiederholt werden).



**Abbildung 20: Gelöst-Kohlenstoffkonzentration (DOC dissolved organic carbon) an vier Messstellen a – d entlang der Belebung in der Straße 1 und der Straße 2 im Vergleich.**

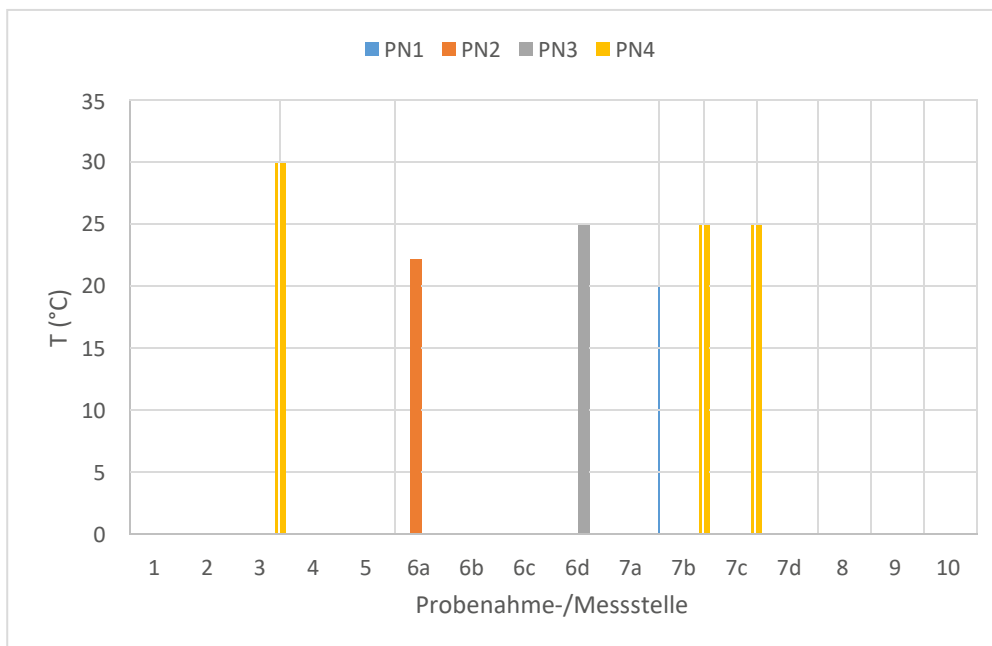
### Ergebnisse der Beprobung entlang der Abwasserreinigung während der Graspapierproduktion Charge A

In Abbildung 21 ist der Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Abwasser entlang der Abwasserreinigung dargestellt von Messstelle 1 bis Messstelle 10 (Abbildung 17) für die vier Probenahmezeitpunkte. Es konnte an jeder Messstelle Sauerstoff nachgewiesen werden. Die Sauerstoffversorgung der Abwasserreinigung war an jedem Messpunkt zu allen vier Probenahmezeitpunkten gewährleistet. Es zeigte sich, dass die Sauerstoffkonzentration im Zulauf der Nachklärung zwischen 4 und 5 mg/l lag. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Sauerstoffzehrung damit an dieser Messstelle gering war. Dies korreliert mit den Messungen des DOC (Abbildung 25).



**Abbildung 21: Sauerstoffkonzentration entlang der Abwasserreinigungsanlage an den Mess- bzw. Probenahmestellen, zu jeweils vier Mess-/Probenahmezeitpunkten PN1 bis PN4.**

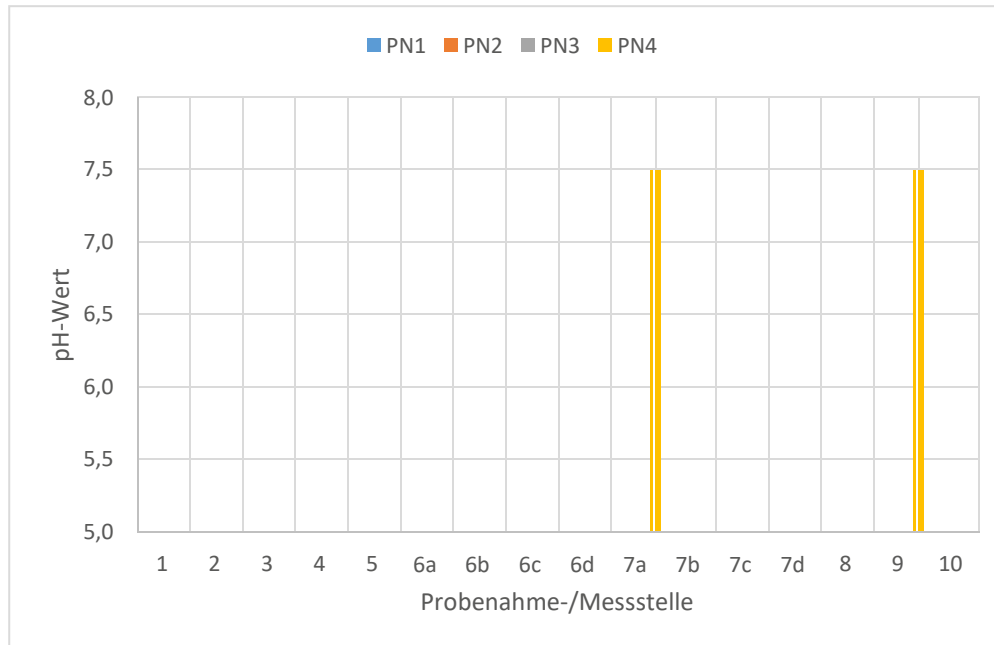
In Abbildung 22 ist der Verlauf der Temperatur im Abwasser entlang der Abwasserreinigung dargestellt von Messstelle 1 bis Messstelle 10 (Abbildung 17) für die 4 Probenahmezeitpunkte. Es zeigte sich, dass die Temperatur zwischen 19 °C und 30 °C lag, wobei die höchsten Temperaturen an den Messstellen 1 bis 5 festgestellt wurden. Der Ablauf der Kläranlage an Messstelle 10 Nachklärung zeigte Temperaturen von 20 °C bis 23 °C. An die Nachklärung schließen sich die Teiche an, so dass davon auszugehen ist, dass das Abwasser sich im weiteren Verlauf bis zur Einleitung in die Lauter noch weiter abkühlt.



**Abbildung 22: Temperatur des Abwassers an den Messstellen, die den Probenahmestellen entsprechen, entlang der Abwasserreinigungsanlage an den Mess-/Probenahmestellen, zu jeweils vier Probenahmezeitpunkten PN1 bis PN4.**

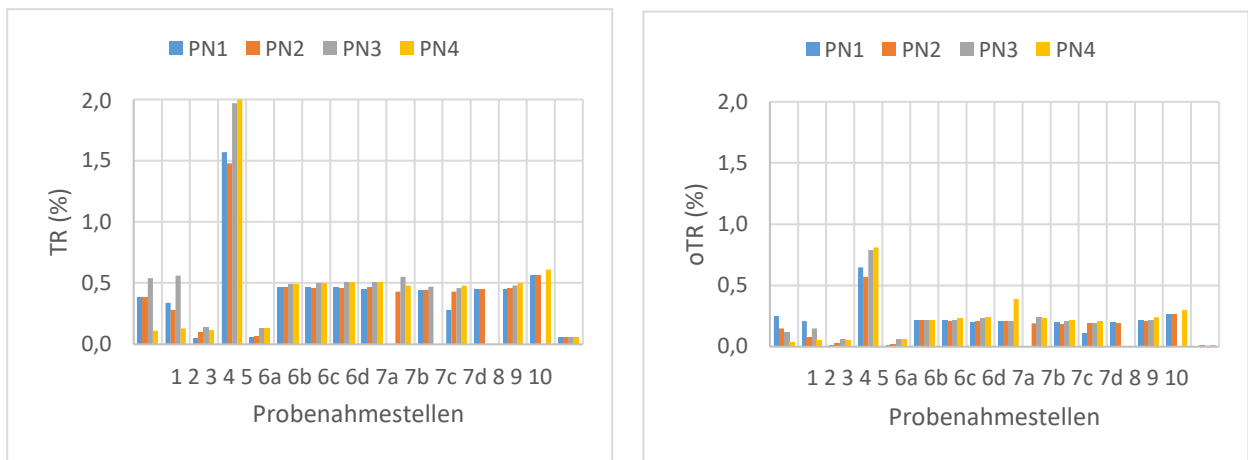
In Abbildung 23 ist der Verlauf des pH-Wertes im Abwasser entlang der Abwasserreinigung dargestellt von Messstelle 1 bis Messstelle 10 (Abbildung 17) für die 4 Probenahmezeitpunkte. Es zeigte sich, dass der pH-Wert zwischen etwa 6,8 und 7,8 C lag, wobei der pH-Wert entlang der Abwasserreinigung tendenziell anstieg und die höchsten pH-Werte von > 7,5 im Ablauf der Nachklärung ermittelt wurden.

Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete



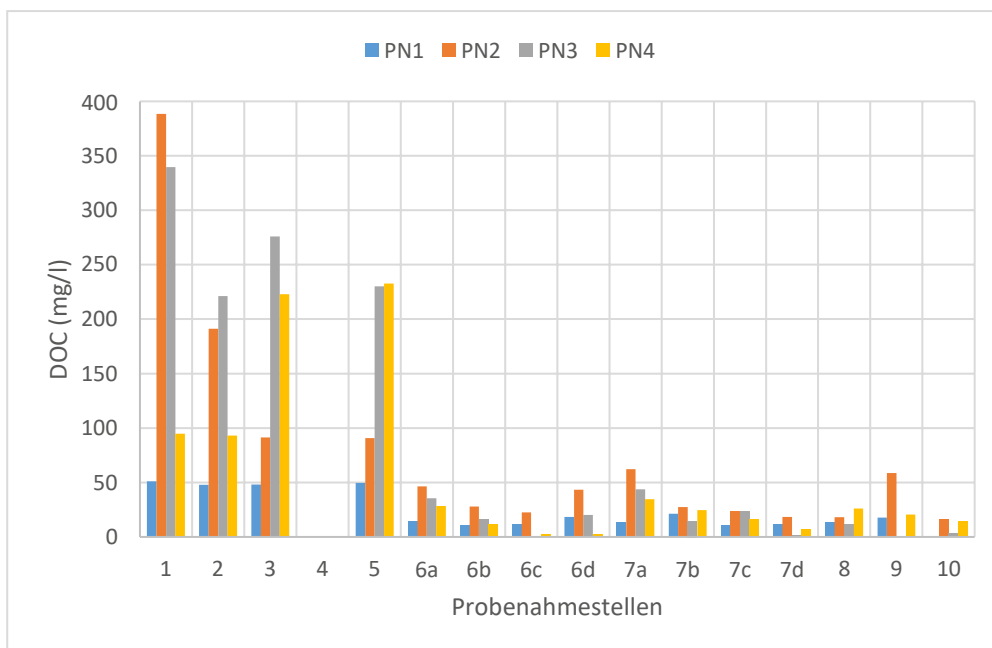
**Abbildung 23: pH-Wert im Abwasser an den Messstellen, die den Probenahmestellen entsprechen, entlang der Abwasserreinigungsanlage an den Mess-/Probenahmestellen, zu jeweils vier Probenahmezeitpunkten PN1 bis PN4.**

In Abbildung 24 ist der Verlauf der TR- und oTR-Gehalte im Abwasser entlang der Abwasserreinigung dargestellt von Messstelle 1 bis Messstelle 10 (Abbildung 17) für die 4 Probenahmezeitpunkte. Es zeigte sich, dass der TR-Gehalt in den Belebungsbecken bei meist bei etwa 0,5 g/l lag, wobei die höchsten TR-Gehalte von > 1,5 g/l erwartungsgemäß an Messstelle 4 festgestellt wurden. Die oTR-Gehalte zeigten mit 0,22 g/l in den Belebungsbecken (Probe 6 a bis 6 d und 7 a bis 7 d) vergleichsweise geringe Werte. Denn der oTR-Gehalt lag damit nur bei 44 % des TR-Gehalts. Dies deutet auf aerobe Schlammstabilisierung hin und würde bedeuten, dass aufgrund der ausreichenden Sauerstoffversorgung sowie der geringen Schlammbelastung aerobe Schlammstabilisierung stattgefunden hat.



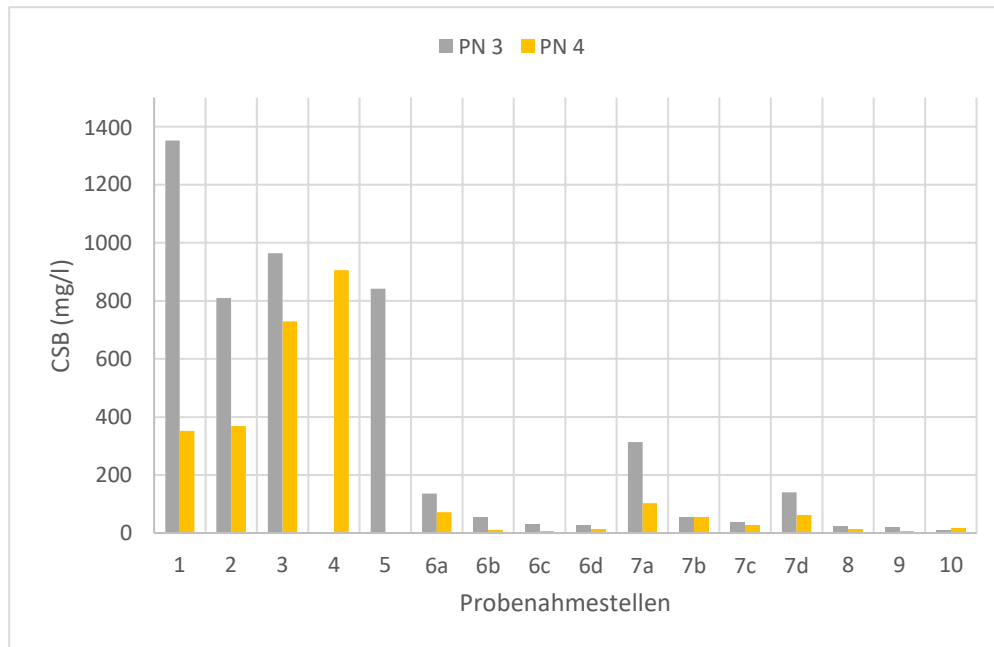
**Abbildung 24: TR- und oTR-Konzentration in Proben, entnommen entlang der Abwasserreinigungsanlage an den Probenahmestellen 1 bis 10, zu jeweils vier Probenahmezeitpunkten PN1 bis PN4.**

In Abbildung 25 ist der Verlauf des Kohlenstoffgehalts DOC (dissolved organic carbon) im Abwasser entlang der Abwasserreinigung dargestellt von Messstelle 1 bis 10 (s. Abbildung 17) für die vier Probenahmezeitpunkte. Es zeigte sich, wie schon in Abbildung 20, dass die Proben der Probenahme PN1 die geringsten Konzentrationen aufwiesen. Mit der Probenahme 2 stiegen die DOC-Konzentrationen v.a. in den Proben vor der Belebung deutlich an auf Werte von maximal 380 mg/l. Es zeigte sich v.a. an Probe 5, dass die Konzentration im Zulauf der Belebung mit zunehmender Zeit, d.h. von Probenahme 1 bis Probenahme 4, angestiegen ist. Im weiteren Verlauf bis zur Probe 10 Nachklärung gingen die DOC-Werte deutlich zurück auf unter 20 mg/l. Die Reinigung der gelösten Abwasserinhaltsstoffe ist erfolgt.



**Abbildung 25: DOC-Konzentration in Proben, entnommen entlang der Abwasserreinigungsanlage an den Probenahmestellen 1 bis 10, zu jeweils vier Probenahmezeitpunkten PN1 bis PN4.**

In Abbildung 26 ist der Verlauf der CSB-Konzentration im Abwasser entlang der Abwasserreinigung dargestellt von Messstelle 1 bis Messstelle 10 (s. Abbildung 17) für zwei Probenahmezeitpunkte PN3 und PN4. Die hohen Zulaufkonzentrationen von > 800 mg/l wurden in den Belebungsbecken deutlich reduziert. Die Ablaufwerte in der Nachklärung waren < 10 mg/l. Es konnte keine Überlastung der Abwasserreinigung nachgewiesen werden.



**Abbildung 26: CSB des Abwassers an den Probenahmestellen entlang der Abwasserreinigungsanlage zu jeweils zwei Probenahmezeitpunkten PN3 und PN4.**

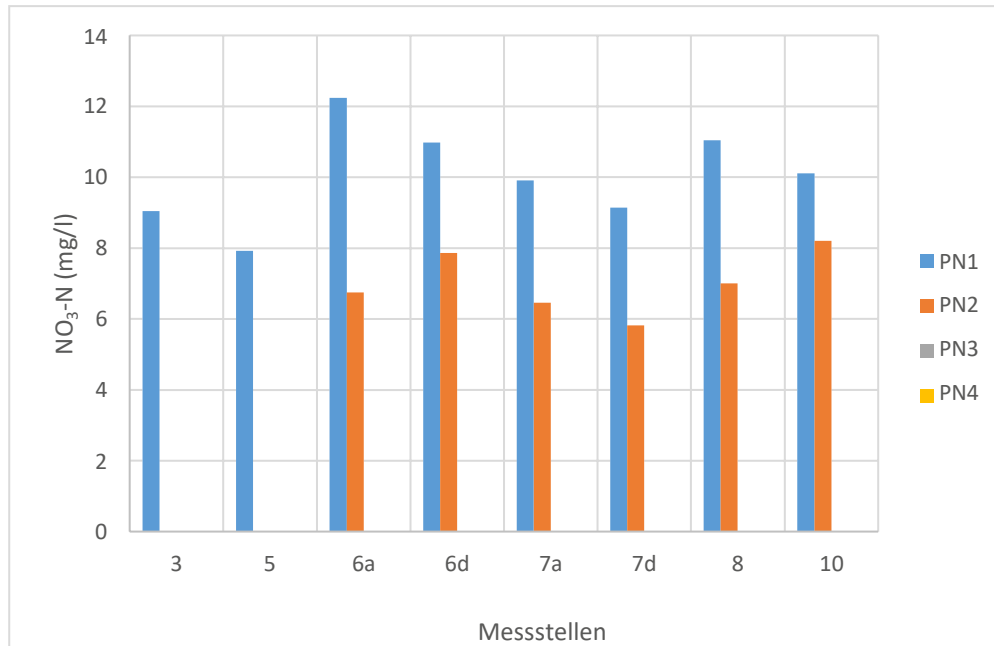
#### 3.4.2.4 Ergebnisse der Beprobung der Abwasserreinigung während der Graspapierproduktion Charge B

Die Produktion der Charge B dauerte insgesamt 6 Tage. In diesem Zeitraum wurden insgesamt 4mal Proben genommen. Die Probenahmestellen sind in Tabelle 10 zusammengefasst, die Probenahmezeitpunkte sind in 3.4.2.2 (S. 34) beschrieben. Da mit den Analyseergebnissen aus der Beprobung der Charge A eine Überlastung bzw. ein Durchbruch der Schmutzfracht in die Nachklärung nicht festgestellt werden konnte, erfolgte die Beprobung der Charge B nur noch an ausgewählten Probenahmestellen. Die Proben wurden v.a. hinsichtlich der Stickstoffwerte analysiert.

Wie in Abbildung 27 ersichtlich, lagen die nachweisbaren Nitratstickstoffwerte bei der Probenahme 1 und 2 zwischen etwa 6 mg/l und 12 mg/l. Für die Proben aus den Probenahmen 3 und 4 ergaben sich Nitratstickstoffwerte, die nicht nachweisbar waren (< 1,7 mg/l).

Auch für die Ammoniumstickstoffwerte wurden Konzentrationen ermittelt, die meist unterhalb der Nachweisgrenze von 0,13 mg/l lagen. Nur in wenigen Ausnahmen waren Konzentrationen von bis zu maximal 0,25 mg/l messbar.

Die Messungen der Phosphat-Phosphor-Konzentrationen ergaben meist Werte, die unterhalb der Nachweisgrenze von 0,01 mg/l lagen. Nur in wenigen Proben waren nachweisbare Konzentrationen von maximal 0,045 mg/l P nachweisbar.



**Abbildung 27: Nitrat-Stickstoff des Abwassers an den Probenahmestellen entlang der Abwasserreinigungsanlage zu jeweils vier Probenahmezeitpunkten PN1 bis PN4.**

### 3.5 Entwicklung eines Konzepts zur zukünftigen Abwasserreinigung

Die Abwasserreinigungsanlage einer Papierfabrik, die die Produktion auf Graspapier umstellt, sollte die Reinigung auch für die neu entstehenden Abwässer gewährleisten. Mit der Produktionsumstellung sind auch Veränderungen der Abwassersituation verbunden. Allerdings ist die Abwasserreinigung für eine herkömmliche Papierproduktion mit den verschiedensten Reinigungsstufen ausgestattet, die, wenn möglich, auch für die Reinigung von Graspapier eingesetzt werden sollten. So könnten zunächst hohe Investitionskosten vermieden werden. Allerdings ist dafür eine angepasste Prozessführung notwendig, die dazu geeignet ist, das Abwasser mit den vorhandenen Aggregaten und Bauwerken zuverlässig zu reinigen. Sollten dennoch Investitionskosten nötig werden durch Erneuerung oder Instandhaltung von einzelnen Bauwerken, dann wäre damit einhergehend auch die Realisierung eines an die Produktion angepassten Reinigungskonzepts möglich.

Bei der Graspapierproduktion fallen Abwässer bzw. Waschwässer an, die lösliche und suspendierte Inhaltsstoffe des Heus enthalten. Diese weisen hohe Feststoffgehalte sowie auch hohe CSB-Werte auf und sind organischen Ursprungs und biologisch abbaubar. Werden die suspendierten Feststoffe nicht abgetrennt, gelangen sie ins Abwasser und müssen aufwändig und mit hohem Sauerstoffeintrag behandelt werden. Außerdem verursachen sie Probleme und Verunreinigungen auf der Papiermaschine. Dies führt zu wasser-, personal- und kostenintensiven Reinigungsarbeiten. Zudem wird dadurch auch der Einsatz von Bioziden notwendig. Insofern sollten die für die Papierherstellung nötigen Fasern von den „Verunreinigungen“, die nicht für die Papierherstellung geeignet sind, schon vor dem Auftragen auf die Papiermaschine abgetrennt werden.

Daraus ergeben sich verschiedene Konzeptvarianten.

#### Variante 1:

Das vor der Papierherstellung abgetrennte Washwasser mit hoher CSB-Konzentration und vergleichsweise geringem Durchsatz könnte als Substrat für eine Biogasanlage verwertet werden. Diese wird für den Betrieb für dieses Substrat ausgelegt. Für die Auslegung müssen das Aufkommen, die Konzentration sowie die Biogausausbeute ermittelt werden, um so eine prozessangepasste Biogasanlage zu installieren und anschließend betreiben zu können. Dafür wären Investitionskosten erforderlich. Geeignete firmenfremde Substrate aus der Region könnten ebenfalls in diese Biogasanlage eingebracht werden und die Biogasmenge und somit die verfügbare Energie steigern. Die bisherige aerobe Abwasserreinigung würde bestehen bleiben und weiterhin für die zuverlässige Reinigung des Abwassers aus der Papierproduktion zur Verfügung stehen. Gegebenenfalls könnte eine Straße der Abwasserreinigung außer Betrieb genommen werden, da zu erwarten ist, dass die Belastung bei dieser Verfahrensvariante deutlich zurückgehen wird.

#### Variante 2:

Alternativ dazu könnte das Washwasser mit dem anfallenden Abwasser zusammen im bestehenden Accelator mechanisch vorbehandelt und so von den suspendierten Feststoffen gereinigt werden. Die abgetrennten Feststoffe können in die örtlich vorhandene Verbrennung überführt werden. Die löslichen Inhaltsstoffe würden in der aeroben Belebung gereinigt werden können. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, ist das Potential für hohen Sauerstoffeintrag bei dieser Anlage in den Belebungsbecken gegeben. So ist davon auszugehen, dass auch zukünftig eine zuverlässige Abwasserreinigung gewährleistet ist. Durch den vorhandenen Pufferturm können zudem extreme Belastungsspitzen durch Rückhaltung des Abwassers ausgeglichen werden.

#### Variante 3:

Eine weitere Alternative könnte eine vorgeschaltete anaerobe Stufe in Kombination mit der bisherigen aeroben Abwasserreinigung als zweite Stufe darstellen. Der Vorteil wäre, dass hohe Belastungen anaerob zu Biogas gewandelt werden könnten. Für den Abbau der hoch konzentrierten Schmutzfracht ist eine Anaerob-Stufe sehr gut geeignet, da hierfür kein Energieeintrag in Form von Sauerstoff notwendig ist und gleichzeitig Biogas als regenerativer Energieträger gewonnen werden kann.

## 3.6 Ermittlung von Maßnahmen im Bereich Energieeffizienz

Anhand der Datenlage und des Anlagen-Ist-Zustands sollte der Energiebedarf für einzelne Prozessschritte aufgenommen und dokumentiert werden. Repräsentative Daten standen nicht zur Verfügung. Deshalb wird hier auf grundsätzliche Maßnahmen eingegangen, die auf der Basis der langjährigen Erfahrungen des Projektbearbeitungsteams erarbeitet wurden. Ausgleichend dazu wurde der Bearbeitungsschwerpunkt im Projekt auf die Faservorbereitung/-konditionierung gelegt. Diese Untersuchungen fanden nicht nur im Labor-, sondern auch teils im Pilotmaßstab statt.

Bei der aeroben Abwasserreinigung sowie der thermischen Schlammbehandlung handelt es sich um energieintensive Prozesse. Aufgrund der ermittelten Betriebsweisen der einzelnen Apparate und Anlagen, liegen die Energieeinsparpotenziale im vorliegenden Fall



- in den im vorliegenden Bericht beschriebenen Rohstoffvorbereitungsprozessen und einer darauf angepassten Abwasserreinigung
- in einer angepassten, bedarfsorientierten Regelung der Sauerstoffzufuhr in der Belebung
- in einer Senkung des Sollwerts der Sauerstoffkonzentration in den Belebungsbecken auf Werte von z. B. 1,5 mg/l, die ausreichende Sauerstoffversorgung gewährleisten aber energieintensiven Sauerstoffüberschuss vermeiden
- in einer energetischen Verwertung der abgetrennten Organik im Waschwasser der Heufasern durch eine anaerobe Vergärung
- in der Gewinnung von Biogas (Ausbeute s. Kap. 3.3.2) und dessen Verwertung in Form von Strom/Wärme
- in einem Wärmerückgewinnungskonzept aus dem Abwasser in Form von Niedrigwärme
- in der Stilllegung des Verbrennungsofens

### 3.73.7

## Einfluss der Heubehandlung auf die verarbeitungstechnischen Eigenschaften und die damit verbundenen Anforderungen an den Werkstoff

### 3.7.1 Durchführung des Laborversuchs

Die benötigten Materialien wurden im Labor auf einem Frank Blattbildner (gem. DIN 54 358) hergestellt. Da sich hierbei nur isotrope Blätter erzeugen lassen, wurden für die Untersuchungen der Verarbeitbarkeit zusätzlich Papiere und Kartons auf einer Pill Nassvlies-Laboranlage mit 306 mm Formationsbreite (Leihgabe Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung TITK) hergestellt. Zur Trocknung wurde an der Nassvliesanlage ein Mathias Durchlauftrockner KTF 500 eingesetzt. Zur Herstellung des Versuchsmaterials wurden das vom IGB gewaschene Fasermaterial, ungewaschene Pellets aus derselben Charge sowie Lang- und Kurzfasierzellstoff eingesetzt.

#### Probenvorbereitung

Um erste Richtwerte für den Einfluss von gewaschenen und ungewaschenen Grasfasern in Kartonagen zu bekommen, wurden Laborblattbildungen durchgeführt. Wie jeder standardisierte Versuch folgt auch die Blattbildung mittels Blattbildner einem genauen Ablauf.

Die Probenvorbereitung begann mit dem Festlegen der gewünschten Blattparameter. Diese richten sich nach dem Mahlgrad der Fasern, den Faseranteilen in der Fasersuspension und der Grammatur des herzustellenden Blattes. Als anzustrebende Grammatur wurde ein 250 g/m<sup>2</sup> Karton ausgewählt.

Um die Gewichtsanteile in der Fasersuspension wie gewünscht zu erhalten, müssen vor dem Errechnen dieser, die Feuchtegehalte der einzelnen Faserrohstoffe bestimmt werden. Dies wird durch ein Feuchtemessgerät erzielt, welches die jeweilige, zuvor gewogene Faserprobe auf 120°C erhitzt und die durch den Wasserverlust erzielte

Gewichtsdifferenz ausgibt. Die nun mit den Feuchteprozent errechneten Gewichte, werden im Folgenden mit den Abkürzungen otro (ofentrocken) und lutro (lufttrocken) beschrieben.

Für die Herstellung eines 250 g/m<sup>2</sup> Blattes auf dem Blattbildner benötigt man 8,66 g Gesamtfasermasse otro. Dies errechnet sich aus der Blattfläche des erzeugbaren Blatts mit dem Durchmesser 0,21 m. Pro Blattbildnerzyklus werden 4 Blätter hergestellt, daher beläuft sich die Gesamtfasermasse pro Zyklus auf 34,64 g Otro.

$$\frac{A_{\text{Blatt}} \times \pi}{4} \times \rho_{\text{Faser}} = m_{\text{Faser}} \quad \text{GGGGGGBBBBBGGGGGGBBBBBGGGGGG}$$

**Tabelle 11: Daten zur Produktion Graspapier**

	Anteil an Gesamtfasermasse [%]	Gewichtsanteil Otro [g]	Ermittelte Feuchte [%]	Gewichtsanteil Lutro [g]
<b>Probe A</b>				
Gras gewaschen	50	17,32	89	157,45
Zellstoff (lang)	50	17,32	7	18,62
<b>Probe B</b>				
Gras ungewaschen	50	17,32	19	21,38
Zellstoff (lang)	50	17,32	7	18,62

**Ablauf Suspensionsvorbereitung**

- Abwiegen der Faserbestandteile (s.o.)
- Auflösen im Aufschlaggerät für 15 min mit 3 l Wasser
- Entwässerung über Nutsche
- Aufgießen des entwässerten Faserkuchens auf 300 g Gesamtmasse
- Mahlen in PFI-Mühle mit 3000 Umdrehungen nach DIN EN 25264-2
- Aufgießen der gemahlene Fasern im Verteilergefäß mit 10 l Wasser (10 ml/1g/m<sup>2</sup> -> 250 g/m<sup>2</sup> x 4 =1000 g/m<sup>2</sup> = 10000 ml = 10 l)

**Ablauf der Blattbildung und -trocknung**

Die labordimensionierte Blattbildung erfolgt in zwei Hauptschritten, der Blattbildung und der Trocknung. Die Blattbildung unterteilt sich zusätzlich in mehrere

Verfahrensabschnitte, welche eine vergleichbare und reproduzierbare Blattqualität garantieren sollen. Diese sind:

Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete

- Wässern: Zu Beginn wird das Behältnis des Blattbildners mit Wasser gefüllt.
- Faserzufuhr: Dem Wasser werden die vorgemischten Fasersuspensionen zugeführt.
- Luftwirbel zuführen: Um eine homogene Faserverteilung in der neuen Suspension zu erreichen werden Luftwirbel in diese eingeblasen.
- Suspension beruhigen: Nach dem Abstellen der Luftwirbel wird die Suspension beruhigt.
- Entleeren: Der Suspension wird das Wasser entzogen und die Fasern verbleiben auf dem Sieb des Blattbildners.
- Abschlagen: Das entstandene Blatt wird nach dem Beschichten mit einem speziellen Ablösepapier, vom Sieb abgeschlagen.

Nachdem das Blatt durch den Blattbildner erzeugt wurde, liegt es als dünne Faserschicht auf dem Ablösepapier vor. Erst nach einem 10-minütigen Trockenvorgang in dampfbeheizten Vakuumpressen kann das fertige, trockene Blatt vom Ablösepapier abgezogen werden.

Bevor die Versuche durchgeführt werden, werden alle Proben für 48 Stunden bei 23°C und 50% relativer Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank konditioniert.

Für die Versuche Feuchtigkeitsbestimmung, Bedruckbarkeit, Scheuerfestigkeit, Robinson-Test, Rilltest, Oberflächenspannung, Cobb-Test und Glätte nach Bekk werden Proben verwendet, die die gleiche inhaltliche Zusammensetzung haben wie die Proben des Blattbildners, jedoch auf einer Nassvliesmaschine hergestellt und anschließend mit Heißluft getrocknet wurden.

### 3.7.2 Flächengewicht und Dicke

#### Material und Methoden:

Es werden je 10 Proben ungewaschener und gewaschener Faserstoff ausgestanzt. Diese haben die definierte Fläche von je 100 cm<sup>2</sup>. Im Anschluss werden diese gewogen. Anhand des Gewichtes und der bekannten Fläche von 100 cm<sup>2</sup> kann die flächenbezogene Masse auf einen Quadratmeter hochgerechnet werden. Mit Hilfe eines analogen Dickenmessgerätes wird im Anschluss die Dicke der Proben (Tabelle 12, Tabelle 13) und die Flächengewichte bestimmt (Tabelle 14, Tabelle 15).

#### Ergebnisse:

Dickenmessung:

**Tabelle 12: Dickenmessung Graspapier Maschine**

Papiermaschine	Gewaschen	Ungewaschen
Durchschnitt	0,68 mm	0,67 mm
Standardabweichung	0,02 mm	0,04 mm

**Tabelle 13: Dickenmessung Graspapier Blattbildner**

-----  
Eingehender Bericht über die  
einzelnen Arbeitspakete  
-----

Blattbildner	Gewaschen	Ungewaschen
Durchschnitt	0,51 mm	0,53 mm
Standardabweichung	0,04 mm	0,01 mm

Flächengewicht:

**Tabelle 14: Flächengewicht Graspapier Maschine**

Papiermaschine	Gewaschen	Ungewaschen
Durchschnitt	162 g/m <sup>2</sup>	164 g/m <sup>2</sup>
Standardabweichung	3,56 g/m <sup>2</sup>	1,21 g/m <sup>2</sup>

**Tabelle 15: Flächengewicht Graspapier Blattbildner**

Blattbildner	Gewaschen	Ungewaschen
Durchschnitt	254 g/m <sup>2</sup>	254 g/m <sup>2</sup>
Standardabweichung	19,05 g/m <sup>2</sup>	3,08 g/m <sup>2</sup>

### **Diskussion:**

Zwischen gewaschenem und ungewaschenem Material lassen sich aufgrund gleicher Produktionsbedingungen keine gravierenden Unterschiede bei Dicke und Flächengewicht feststellen.

### **3.7.3 Feuchtigkeitsbestimmung**

#### **Material und Methoden**

Es werden je 10 Proben ungewaschener und gewaschener Faserstoff ausgeschnitten.

Um die Feuchtigkeit des Materials zu bestimmen, wird das Prüfgerät Sartorius MA 30 verwendet. Die Proben werden in einer Einwegschaale aus Aluminium im Gerät platziert. Anschließend werden sie auf 110°C erhitzt. Die Prüfung stoppt automatisch, wenn das Gerät keine Gewichtsänderung mehr erkennt. Aufgrund der Gewichtsänderung wird

der prozentuale Wasseranteil ermittelt. Nach jeder Messung wird die Aluminiumschale auf Raumtemperatur abgekühlt.

## Ergebnisse

Sowohl der gewaschene, als auch der ungewaschene Zellstoff weisen ähnliche Feuchtigkeitswerte auf. Unterschiede sind zu vernachlässigen, aufgrund ähnlicher Standardabweichungen (Tabelle 16).

**Tabelle 16: Feuchtigkeitsanteil in %**

	Ungewaschen	Gewaschen
Durchschnitt	11,46%	11,33%
Standardabweichung	1,50	1,31

## Diskussion:

Der Feuchtegehalt liegt für Graspapier in einem vertretbaren Rahmen, um die Versuche durchführen zu können.

### 3.7.4 Zugfestigkeit

#### Material und Methoden:

Für den Versuch wird die Zugprüfmaschine Universal Tester Vertical der Firma FRANK-PTI verwendet. Es werden je 10 Proben des gewaschenen und ungewaschenen Faserstoffes auf das Maß 200 x 15 mm zugeschnitten. Der Klemmabstand beträgt 100 mm und die Vorkraft 1N. Die Proben werden in die Maschine eingespannt und der Zugversuch durchgeführt.

## Ergebnisse:

**Tabelle 17: Kraftmaximum Zugversuch**

	Gewaschen	Ungewaschen
Durchschnitt	153,56 N	135,21 N
Standardabweichung	10,13 N	13,82 N

**Tabelle 18: Bruchdehnung Zugversuch**

-----  
Eingehender Bericht über die  
einzelnen Arbeitspakete  
-----

	Gewaschen	Ungewaschen
Durchschnitt	3,88%	3,56%
Standardabweichung	0,32%	0,42%

**Diskussion:**

Durch den Waschvorgang werden Störstoffe aus den Fasern gelöst, was positiv zur Blattbildung beiträgt. Beim Zugversuch zeigt sich, dass die Faser-Faser-Bindungen durch den Waschvorgang verbessert wurden.

**3.7.5 2 Punkt-Biegesteifigkeit**

**Material und Methoden:**

Für diesen Versuch wird der 2-Punkt Biegesteifigkeitsprüfer TS der Firma FRANK-PTI verwendet. Es werden je 10 Proben des gewaschenen und ungewaschenen Faserstoffes auf das Maß 90 x 38 mm zugeschnitten. Die Proben wurden zuvor bei klimatischen Bedingungen von 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit für 48 Stunden eingelagert.

Die Proben werden in die Maschine eingespannt und der Versuch gem. DIN 53121 durchgeführt.

**Ergebnisse:**

**Tabelle 19: Auswertung Biegesteifigkeit**

	Gewaschen	Ungewaschen
Durchschnitt	19,96 Nmm	19,44 Nmm
Standardabweichung	3,22 Nmm	1,29 Nmm

**Diskussion:**

Aufgrund identischer Faserlängen ist die Biegesteifigkeit nahezu identisch. Die Faser-Faser-Bindung trägt nur geringfügig zur Steigerung der Biegesteifigkeit bei.

### 3.7.6 Bedruckbarkeit und Scheuerfestigkeit

#### Material und Methoden:

Für den Versuch werden je 2 Proben des gewaschenen und des ungewaschenen Faserstoffs ausgeschnitten. Die Maße betragen 240 x 50 mm, vorgegeben durch die Geometrie der Prüfgeräte.

Für den Bedruckbarkeits-Test wird eine Probedruckmaschine der Firma Prüfbau eingesetzt. Auf eine der Gummiwalzen wird Druckfarbe aufgebracht und für 30 Sekunden verrieben. Von dort wird die Farbe innerhalb von 30 Sekunden auf eine der Auftragswalzen übertragen. Diese wird mit aufgebrachter Druckfarbe gewogen. Anschließend wird sie in die Prüfdruckmaschine eingesetzt und die Probe mit einem Anpressdruck von 600 N cm<sup>-1</sup> und einer Druckgeschwindigkeit von 1 m s<sup>-1</sup> bedruckt. Gegendruck und Druckform werden dabei auf 30° C temperiert. Es werden je zwei Proben des gewaschenen und ungewaschenen Graspapieres bedruckt, jeweils auf der oberen Seite, die bei der Papierproduktion dem Sieb abgewandt ist. Nach jedem Druckvorgang wird die verbrauchte Farbe ersetzt und verrieben, die Farbwalze erneut gewogen und die Differenz bestimmt. So wird ermittelt, wie viel Druckfarbe auf den Bedruckstoff übergegangen ist. Die Proben werden anschließend über Nacht getrocknet.

Für die Ermittlung der Scheuerfestigkeit wird das Quadrant Scheuerprüfgerät der Firma Prüfbau verwendet. Die bedruckten Proben werden in die Scheuerspannplatten eingelegt und befestigt. Auf die Gewichte werden jeweils unbedruckte und ausgestanzte Proben der jeweiligen Materialien aufgebracht, sodass ungewaschenes Material auf ungewaschenem scheuert und gewaschenes auf gewaschenem. Die bedruckten und unbedruckten Proben werden durch die Gewichte mit einer konstanten Kraft von 0,5 N/cm<sup>2</sup> aufeinandergepresst. Für den Versuch werden 100 Scheuervorgänge durchgeführt. Im Anschluss wird sowohl die bedruckte, als auch die unbedruckte Probe anhand einer Skala von 1 bis 5 optisch beurteilt.

- 1: kein Abrieb
- 2: leichter Abrieb
- 3: mittlerer Abrieb
- 4: starker Abrieb
- 5: starker Abrieb und Druckbildverletzung

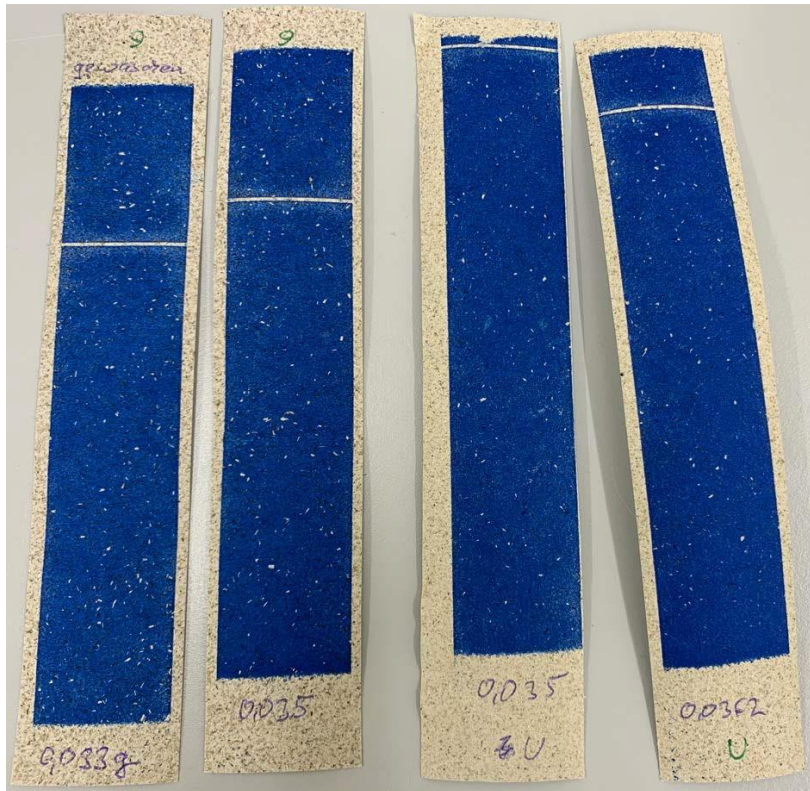
#### Ergebnisse:

Der Bedruckbarkeitstest liefert ähnliche Ergebnisse für das gewaschene und das ungewaschene Graspapier (Tabelle 20).

**Tabelle 20: Probedruck Gewichtsdifferenz**

-----  
Eingehender Bericht über die  
einzelnen Arbeitspakete  
-----

Versuch	Gewichtsdifferenz Ungewaschen
1	0,035g
2	0,036g
	Gewichtsdifferenz Gewaschen
3	0,033g
4	0,035g



**Abbildung 28: Probedrucke**



Alle vier Proben weisen nach dem Scheuertest einen starken Abrieb inklusive Druckbildverletzung auf, fallen damit in die Kategorie 5.

Eingehender Bericht über die einzelnen Arbeitspakete

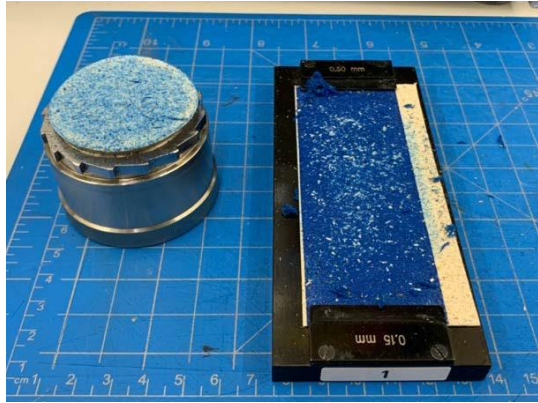


Abbildung 29: Scheuertest Probe 1

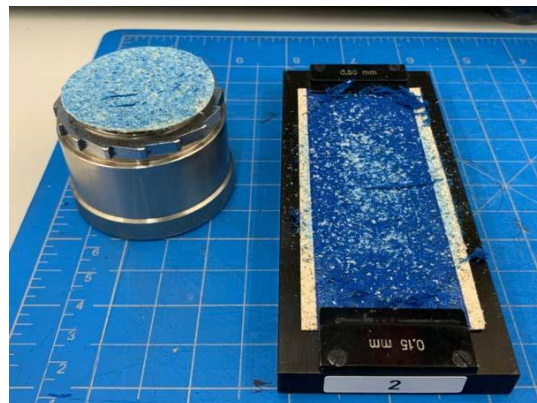


Abbildung 30: Scheuertest Probe 2

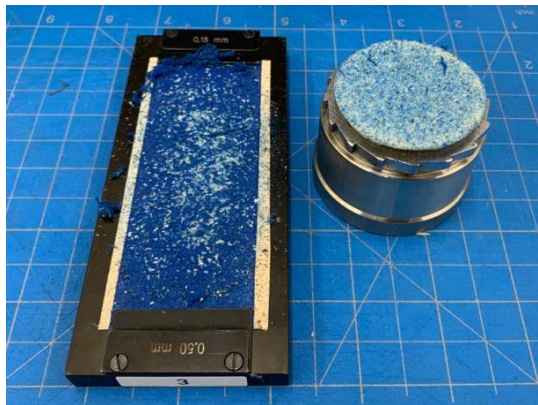


Abbildung 31: Scheuertest Probe 3

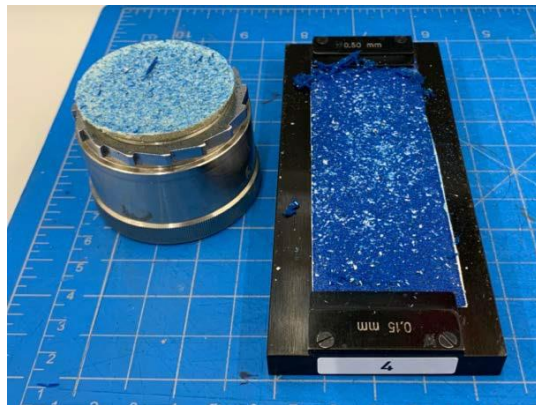


Abbildung 32: Scheuertest Probe 4

### Diskussion:

Aufgrund des aktuellen Trocknungsverfahrens via Umluft kommt es zu keiner Oberflächenpressung während der Trocknung des Papiers. Die Papierbahn wird dabei nicht kalandriert. Bei der Blatt- und Papierbahnerzeugung werden weder Oberflächen- noch Masseleimungsmittel eingesetzt, damit kein Einfluss auf die Faserhaftung genommen wird. Die Faserbindung beruht bei den Probematerialien ausschließlich auf die Wasserstoffbrücken, die sich beim Trocknen der Fasern bilden. Es wird kein Stärke-Strich aufgetragen.

In der Folge werden durch die Zügigkeit der Offsetfarbe beim Abrollen der Druckform auf der Papieroberfläche Fasern gelöst bzw. herausgerissen.

Beim Scheuertest konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den gewaschenen und ungewaschenen Proben festgestellt werden.

### 3.7.7 Cobb-Test

#### Material und Methoden

Für den Versuch werden je 5 Proben des gewaschenen und des ungewaschenen Faserstoffs ausgestanzt. Der Durchmesser der Proben beträgt 120 mm, vorgegeben durch die Geometrie des Prüfgerätes. Alle Proben werden im trockenen Zustand gewogen.

Bei der Prüfmaschine handelt es sich um eine Prüfanordnung für Cobb-Tests der Karl Schröder KG.

In diese Apparatur werden 100 ml Wasser eingefüllt. Anschließend wird die Probe auf die Prüfvorrichtung aufgelegt, die raue Seite des Faserstoffes zeigt dabei nach unten. Die Prüfvorrichtung wird verschlossen. Nun wird die Vorrichtung umgedreht, sodass die Probe direkten Kontakt zur Flüssigkeit hat. Nach 30 Sekunden wird die Vorrichtung zurückgedreht und die Probe entnommen. Im Anschluss wird diese auf einem Löschpapier platziert, um überschüssige Flüssigkeit zu entfernen. Dazu wird auch auf die Oberseite der Probe ein Löschpapier gelegt und mit einer Walze mehrmals über die Probe gerollt. Im Anschluss wird die Probe erneut gewogen.

Der gemessene Wert wird mit dem zuvor gemessenen Wert der trockenen Probe verglichen. Die Differenz ergibt die Masse des Wassers, welches der Faserstoff aufgenommen hat. Diese wird anhand der Fläche auf einen  $m^2$  hochgerechnet.

#### Ergebnisse:

Bereits nach 5 Sekunden ist zu erkennen, dass sich der Faserstoff komplett mit Wasser vollgesaugt hat, da dieses am Rand der Prüfvorrichtung in Tropfen austritt und der Faserstoff dunkel verfärbt ist (Abbildung 33).



Abbildung 33: Austreten von Wasser beim Cobb-Test

Die Werte für das ungewaschene und den gewaschene Material sind sehr ähnlich. Beide liegen bei über 500 g/m<sup>2</sup>. Anhand der Standardabweichung lassen sich große Überschneidungen erkennen.

**Tabelle 21: Wasseraufnahme nach 30 Sekunden**

	Ungewaschen	Gewaschen
Durchschnitt	530,86 g/m <sup>2</sup>	535,04 g/m <sup>2</sup>
Standardabweichung	27,22 g/m <sup>2</sup>	26,21 g/m <sup>2</sup>

### **Diskussion:**

Da bei der Herstellung auf jegliche Leimung verzichtet wurde und auch keine Kalandrierung erfolgte, sind die erzielten Werte zu erwarten.

### **3.7.8 Robinson-Test**

#### **Material und Methoden:**

Aus den Faserstoffen wird je eine quadratische Probe mit der Seitenlänge von 1 dm ausgeschnitten. Als Lebensmittel wird Vollmilchschokolade verwendet. Diese wird geraspelt, um die Oberfläche zu vergrößern. Jeweils 25g der geraspelten Schokolade werden in je einer Keramikschale platziert. Für den Versuch werden drei Einmachgläser benötigt, die luftdicht verschlossen werden können. In diese Gläser wird jeweils gesättigte NaCl-Lösung gegeben. Anschließend werden die Keramikschalen in den Einmachgläsern platziert und dicht verschlossen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die NaCl-Lösung nicht in Berührung mit der Schokolade kommt, da dies zu geschmacklichen Veränderungen führt. Auf die Keramikschalen wird ein Gitter gelegt, um direkten Kontakt zum Faserstoff zu vermeiden. Dieser wird nun auf das Gitter gelegt und das Einmachglas luftdicht verschlossen. Zusätzlich wird in ein Glas nur eine Keramikschale mit NaCl-Lösung und Schokolade gelegt und verschlossen. Diese dient später als Blindprobe. Die Proben werden bei Raumtemperatur 48 Stunden gelagert.

Anschließend werden diese in einem Blindtest sensorisch verkostet und mit der Blindprobe verglichen. Dabei werden die Ergebnisse mit einer Skala von 0 bis 4 bewertet.

- 0: keine wahrnehmbare Geruchs- oder Geschmacksabweichung
- 1: gerade wahrnehmbare Geruchs- oder Geschmacksabweichung
- 2: schwache Geruchs- oder Geschmacksabweichung
- 3: deutlich wahrnehmbare Geruchs- oder Geschmacksabweichung
- 4: starke Geruchs- oder Geschmacksabweichung

## Ergebnisse:

-----  
Eingehender Bericht über die  
einzelnen Arbeitspakete  
-----

**Tabelle 22: Auswertung Robinson-Test**

Versuchsperson	Gewaschen	Ungewaschen
1	3	4
2	4	4
3	2	3
4	2	3
5	2	3

Beide Proben weisen geschmackliche und geruchliche Unterschiede auf. Diese fallen beim ungewaschenen Graspapier stärker aus, als beim gewaschenen.

## Diskussion:

Ggf. wurden beim Waschprozess auch Geschmacks- und Geruchsstoffe herausgelöst, wodurch sich die sensorischen Eigenschaften des Graspapiers leicht verbessert haben und damit weniger Fehlgerüche auffällig werden.

### 3.7.9 Rilltest

#### Material und Methoden:

Für diesen Versuch werden Proben ausgeschnitten und in eine Teststanze der Firma Marbach eingelegt. Dort werden Stanzversuche mit verschiedenen Stanzwerkzeugen und Gegenrichtungen durchgeführt. So entstehen mögliche Kombinationen aus Rillkanalbreite, Rillkanaltiefe, Dicke der Zurichtung und Rilllinienhöhe. Die Proben werden anschließend entlang der Rillung um 180° geknickt und optisch mit einem Fadenzähler begutachtet. Zudem wird eine Probe um 180° geknickt, um eine Referenz für eine aufgeplatzte Rillung zu haben. Der Rilltest ermöglicht eine Bestimmung der Verarbeitungsparameter beim Herstellen von Faltschachteln aus Karton und ist Grundlage für die Definition der Werkzeugparameter von Stanz- und Rillwerkzeugen.

#### Ergebnis:

Bereits beim Knicken des ungerillten Faserstoffes zeigt sich, dass die Fasern beim Knicken nicht aufplatzen, sowohl in Faserlaufrichtung, als auch gegen die Faserlaufrichtung. Es werden zudem noch Proben mit der Stanze ausgestanzt. Auch hier zeigt es sich, dass bei keiner Probe die Fasern beim Knicken aufplatzen. Das betrifft sowohl das gewaschene, als auch das ungewaschene Material. Einzig grobe Fasern im

Graspapier stehen beim Knicken ab. Da diese jedoch inhomogen im Faserstoff verteilt sind, ist dieser Vorgang nicht reproduzierbar.

### Diskussion:

Bei der Herstellung der Blätter wie auch der Herstellung Papierbahn auf der Vliesmaschine werden nur einlagige Materialien erzeugt. Die Erzeugung einer Rillwulst verändert bei einlagigen Materialien den Biege­widerstand nur unwesentlich da es hier nicht zu einer Lösung der Lagen kommt. Die Blätter haben bedingt durch das Herstellungsverfahren keine Laufrichtungsunterschiede. Da die Produktionsgeschwindigkeit der Nassvliesanlage bei 3 m/min liegt stellt sich hier auch keine signifikante Anisotropie ein.

### 3.7.10 Glätte nach Bekk

#### Material und Methoden:

Für den Versuch werden je 5 Proben des gewaschenen und des ungewaschenen Faserstoffs ausgestanzt. Der Durchmesser der Proben beträgt 100 mm, vorgegeben durch die Geometrie des Prüfgerätes.

Als Prüfvorrichtung wird der GPR Glätteprüfer nach Bekk der Firma R+P Electronic Systems verwendet. Aufgrund der rauen Oberfläche des Graspapiers wird bei Einstellung 10V gewählt, bei der ein höheres Volumen eingesaugt wird. Das wird bei Proben benötigt, bei denen die Einsaugzeit im Messbereich V unter 20 s liegt. Liegt die gemessene Zeit unter 2 Sekunden, ist die Messung ungültig und Messverfahren nicht geeignet.

#### Ergebnisse

Sowohl beim ungewaschenen, als auch beim gewaschenen Graspapier wurden in 5 Durchgängen Werte von 0,0 (Bekk)s gemessen. Damit ist die Messung ungültig.

Tabelle 23: Auswertung Glätte nach Bekk

Versuch	Ungewaschen	Gewaschen
1	0,0s	0,0s
2	0,0s	0,0s
3	0,0s	0,0s
4	0,0s	0,0s
5	0,0s	0,0s

## Diskussion:

Eingehender Bericht über die  
einzelnen Arbeitspakete

Die raue Oberfläche des Papiers ermöglicht keine verwertbaren Ergebnisse mit diesem Verfahren, da die Luft zu schnell aus der Prüfanordnung entweicht.

Aufgrund des verwendeten Trocknungsverfahrens via Umluft kommt es zu keiner Oberflächenpressung während der Trocknung des Papiers. Eine Kalandrierung würde ggf. Abhilfe schaffen.

### 3.7.11 Oberflächenspannung

#### Material und Methoden

Für den Versuch werden je 5 Proben des gewaschenen und des ungewaschenen Faserstoffs ausgestanzt. Der Durchmesser der Proben beträgt 100 mm.

Für die Messung wird der Mobile Surface Analyzer der Firma KRÜSS verwendet. Mit Hilfe dessen wird je ein Tropfen einer polaren und einer unpolaren Flüssigkeit auf die Oberfläche aufgebracht und der Kontaktwinkel gemessen. Anhand der Kontaktwinkel der beiden Tropfen wird die Oberflächenspannung bestimmt. Als polare Testflüssigkeit kommt destilliertes Wasser zum Einsatz, an unpolare wird Diiodmethan verwendet.

#### Ergebnisse

Während der Diiodmethan-Tropfen auf der Oberfläche lange genug besteht, um die Kontaktwinkel zu messen, ist dies bei destilliertem Wasser nicht der Fall. Dieses wird vom Faserstoff so schnell aufgesaugt, dass keine Messung möglich ist. Das ist sowohl beim gewaschenen, als auch beim ungewaschenen Graspapier der Fall (Abbildung 34).

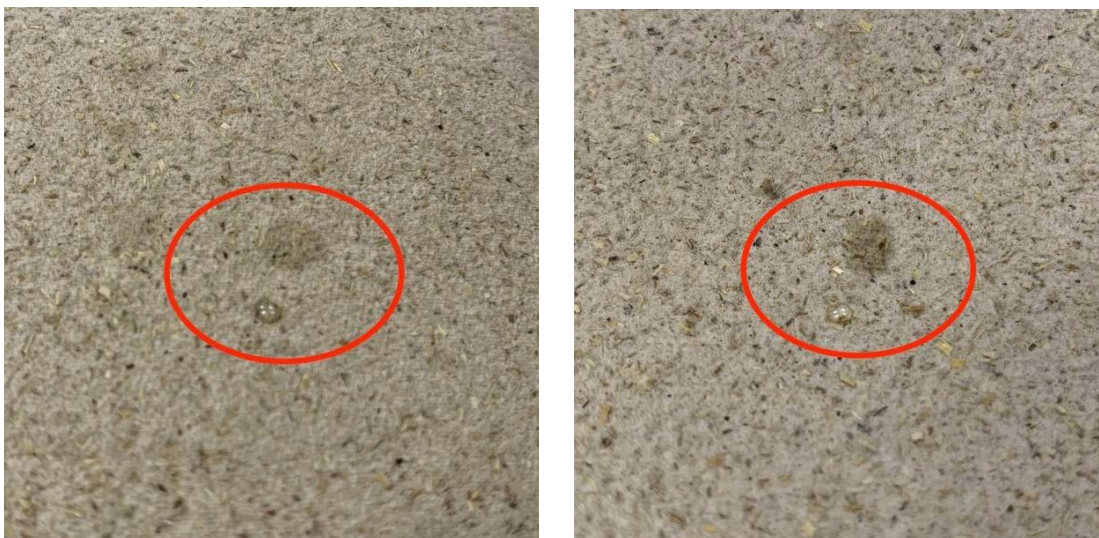


Abbildung 34: Oberfläche ungewaschen und gewaschen



Auf den beiden Abbildungen ist jeweils am unteren Rand des roten Kreises der Diiodmethan-Tropfen erkennbar. Der Wassertropfen ist nicht mehr in Tropfenform erkennbar, sondern nur als dunkler Fleck am oberen Rand des roten Kreises.

---

Eingehender Bericht über die  
einzelnen Arbeitspakete

---

### **Diskussion:**

Die Saugfähigkeit des Graspapiers ist produktionsbedingt so stark, dass das destillierte Wasser direkt aufgenommen wird. Für eine Messung der Oberflächenspannung müsste die Oberfläche durch ein anderes Trocknungsverfahren verändert werden. Alternativ könnten auch zähflüssigere Flüssigkeiten für den Test verwendet werden.

## **3.8 Ausblick**

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Probleme bei der Papierherstellung aus Heu durch eine Vorbehandlung des Materials durch Abtrennung löslicher Bestandteile vermindern lassen sollten. Der Papierproduktionsprozess kann auf diese Weise nur mit den für die Papierproduktion benötigten Bestandteilen betrieben werden. Störungen durch lösliche Bestandteile können vermieden werden. Die Stabilität des Papierproduktionsprozesses kann verbessert werden. Gleichzeitig kann der bisherige Aufwand für arbeitszeit- und wasserintensive Reinigungsprozesse deutlich reduziert werden. Die organische Belastung im Prozesswasser ist reduziert. Und so wird auch die Abwasserreinigungsanlage entlastet werden. Damit werden also insgesamt einerseits Kosteneinsparungen sowie ein reduzierter Personalaufwand verbunden sein z. B. durch eine stabilere Papierproduktion und dadurch höhere Produktionskapazität, einen angemessenen Personaleinsatz durch geringeren Aufwand für die Reinigung der Papiermaschine und sowie auch durch reduzierten Strombedarf für die Belüftung der Belebungsbecken bei der Abwasserreinigung. Außerdem wird so auch eine höhere Sicherheit bei der Einhaltung der Grenzwerte im Ablauf der Abwasserreinigung erreicht. Andererseits steht diesen so erzielten Einsparungen auch ein höherer Aufwand an Personal sowie an Kosten und Gerätschaften gegenüber, die durch die Vorbehandlung der Fasern durch Abtrennung des löslichen Anteils entstehen.

Da inzwischen eine ganze Reihe von Papierfabriken Papier auf Grasbasis herstellen, sind die damit verbundenen Probleme offensichtlich lösbar. Möglicherweise haben Betriebe, die bisher schon Altpapier verarbeiteten und ein vielfältiges Produktspektrum haben, bessere Voraussetzungen für den Einsatz der Grasfasern, auch in Hinblick auf die erhöhten Anforderungen an die betriebseigene Abwasserreinigung, verglichen mit Betrieben, die ausschließlich den Markt von hochwertigem Papier bedienen.

Bei der Papierherstellung auf Heubasis ist aufgrund der nicht optimalen Eigenschaften der Grasfasern für die Papierherstellung immer noch ein Zusatz von herkömmlichem Zellstoff notwendig, so dass auf diese Weise bisher noch kein komplett „holzfreies“ und damit nachhaltigeres Produkt hergestellt werden kann. Um dies zumindest für bestimmte Anwendungsfälle zu erreichen, müssen weitere Rohmaterialien betrachtet werden, die wiederum neue Ansprüche an die Aufbereitung der Fasern stellen. Aktuell werden schon neue Rohstoffquellen wie z. B. die Durchwachsene Silphie für die Fasergewinnung untersucht.

Mit dem Einsatz neuer Fasermaterialien werden Untersuchungen hinsichtlich der Stabilität des Produktionsprozesses, der Papierqualität sowie hinsichtlich der Auswirkungen auf die Abwasserbelastung notwendig. Auch zur Erweiterung des Methodenspektrums bei der Vorbehandlung der Rohmaterialien werden weitere Untersuchungen notwendig, die zu neben den schon oben genannten Auswirkungen

auch zur Verbesserung der Qualität des Ausgangsmaterials beitragen. Dies ist insbesondere z. B. bei der Bereitstellung von Gärresten für die Papierproduktion notwendig.

---

Eingehender Bericht über die  
einzelnen Arbeitspakete

---

Für die neuen Prozesse müssen dann auch geeignete Produktionsanlagen zusammengestellt werden, die Gerätetechnik sollte vorhanden sein.