

Diplomarbeit

Rohstoffcharakterisierung hinsichtlich Pressenentwässerung
mittels einer pneumatischen Presse sowie die Ermittlung
charakteristischer Parameter zur Beschreibung des
Entwässerungsverhaltens

Vorgelegt von
Silke Plobner

In Zusammenarbeit mit
Voith Paper

Begutachter
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Bauer

Betreuer
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Bauer
Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kritzinger
Univ.Doiz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Eichler, MBA (Voith Paper)

Institut für Papier, Zellstoff- und Fasertechnik
Technische Universität Graz
Kopernikusgasse 24/II
8010 Graz

Graz, im Juni 2011

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am
.....
(Unterschrift)

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date
.....
(signature)

Kurzfassung

Die Entwässerung in der Pressenpartie spielt eine große Rolle bezüglich der Effizienz und des thermischen Energieverbrauchs einer Papiermaschine. Aus diesem Grund ist es von großem Interesse, den Trockengehalt nach der Presse abschätzen zu können. Die gängigen Labormethoden zur Charakterisierung des Faserrohstoffs hinsichtlich seiner Entwässerungsleistung sind nicht in der Lage, den erreichbaren Trockengehalt nach der Presse verlässlich abzuschätzen. Deshalb wurde im Hause Voith eine pneumatische Presse entwickelt, die den Pressvorgang durch eine Erhöhung der Flächenmasse verlangsamt und somit beobachtbar macht und im Druckbereich realer Pressen arbeitet.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Rohstoffcharakterisierung von Faserstoffen mittels der pneumatischen Laborpresse und in weiterer Folge mit der Beschreibung der Messdaten durch ein Modell, um charakteristische Parameter zur Beurteilung der Entwässerbarkeit eines Faserstoffes in der Presse zu ermitteln. Es sind Versuche mit unterschiedlichen Drücken und Grammaturen durchgeführt worden, um Informationen bezüglich der Druck- und Grammaturabhängigkeit der einzelnen Faserstoffe zu erhalten. Aus den erhaltenen Messdaten sind mit einem Modell aus der Literatur, das erweitert werden musste, um die Messdaten hinreichend genau darzustellen, Parameter ermittelt worden, die das Entwässerungsverhalten des Rohstoffes beschreiben.

Abstract

The dewatering in the press-section of a paper machine plays a major role regarding the efficiency and the thermal energy consumption of the mill. Therefore it is interesting to know the dry content after the press-section. Unfortunately, a reliable and accurate estimation of the after press dryness is not possible based on the established laboratory techniques for the characterisation of the fibrous raw material alone. Therefore Voith developed a pneumatic laboratory press that slows down the process of press dewatering by increasing the sample grammage. Hence the dewatering process becomes observable. Another advantage of this pneumatic press is that it operates in a realistic pressure range.

The main topic of this work is the characterisation of fibrous raw material with this pneumatic press. Furthermore the measured data is described in terms of a mathematical model. The target was to identify characteristic model parameters for each fibrous raw material that describe its dewatering properties. In order to increase the knowledge on pressure and grammage dependence trials with different pressures and grammage were conducted. After a few tests it turned out that the model taken initially from the literature had to be extended in order to achieve satisfying agreement with the measured data.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	1
2	GRUNDLAGEN DER PRESSENENTWÄSSERUNG	2
2.1	Pressentheorie.....	2
2.2	Einflussparameter beim Nasspressen.....	4
2.2.1	Pressimpuls und Druckprofil.....	4
2.2.2	Eingangstrockengehalt	5
2.2.3	Temperatur	5
2.2.4	Flächenmasse	6
2.2.5	Blatt- und Rohstoffeigenschaften.....	6
2.2.6	Weitere Einflussgrößen	9
2.3	Stand der Technik zur Rohstoffcharakterisierung hinsichtlich Pressenentwässerung	9
2.3.1	Schopper-Riegler (SR) und Canadian Standard Freeness(CSF).....	9
2.3.2	Wasserrückhaltevermögen (WRV).....	10
2.3.3	Centrifugal Compression Value (CCV)	12
2.3.4	Hydraulische Presse	12
2.4	Mathematische Modelle zur Beschreibung des Entwässerungsvorganges.....	12
2.4.1	Viskoelastisches Modell (Kelvin-Body)	12
2.4.2	Stoffentwässerung im Walzenspalt	13
2.4.3	Limiting-Consistency Modell.....	13
2.4.4	Decreasing-Permeability Model.....	15
2.4.5	Modell nach Holstege.....	15
2.4.6	Differentiated Permeability Surface Layer (DPSL)	16
3	METHODISCHES	17
3.1	Beschreibung der pneumatischen Presse	17
3.2	Beschreibung der Versuchsdurchführung.....	19
3.2.1	Durchführung einer Messung.....	19
3.2.2	Messroutine	20
3.3	Vorstellung der gemessenen Stoffe	20
3.3.1	Mischung aus 40% Langfaser und 60% Deinked Pulp.....	21
3.3.2	Unbleached Kraft Pulp	21
3.3.3	Old Corrugated Cardboard	21
3.3.4	Deinked Pulp	22
3.3.5	Unbleached Kraft Pulp 2 und Bleached Kraft Pulp.....	22
3.3.6	Gebleichter Langfaser Sulfatzellstoff.....	22
3.4	Vorversuche zur Bestimmung der Randbedingungen und Einflussgrößen.....	22
3.4.1	Untere Grenze der Grammaturn	22
3.4.2	Maximaler Volumenstrom durch die Kanüle	25
3.4.3	Retention	26
3.4.4	Rückbefeuchtung durch Sieb und Kanüle	28

4	ERMITTLUNG CHARAKTERISTISCHER PARAMETER FÜR VERSCHIEDENE STOFFE.....	32
4.1	Sensitivitätsanalyse	32
4.2	Auswahl eines geeigneten Modells zur Beschreibung der Versuche.....	34
4.2.1	Decreasing-Permeability Model vs. Limiting-Consistency Model	35
4.3	Parametersuche mit dem Limiting-Consistency Model.....	36
4.3.1	Parametersuche für jede Grammatatur innerhalb eines Druckes.....	37
4.3.2	Parametersuche für alle Grammataturen in einem Druckbereich.....	41
4.3.3	Parametersuche für alle Grammataturen und Drücke.....	44
4.4	Erweiterung des Limiting-Consistency Modells.....	46
4.4.1	Hinzufügen eines Druckexponenten.....	46
4.4.2	Hinzufügen eines Impulsexponenten.....	48
4.4.3	Regelmäßige 5% Trockengehaltssteigerung.....	50
4.4.4	Aufteilung in Zeitabschritte.....	51
4.4.5	Validierung und Integrierbarkeit des Modells.....	53
4.4.6	Berücksichtigung der Rückbefeuchtung.....	56
4.5	Messreihenreduzierung	60
5	VERGLEICH DER VERSCHIEDENE ROHSTOFFE UND ANWENDUNG DES MODELLS	63
5.1	Verschiedene Rohstoffe im Vergleich.....	63
5.1.1	Pressdauer.....	64
5.1.2	Entwässerungsarten (flow vs. pressure controlled)	64
5.1.3	Grammataturabhängigkeit	65
5.1.4	Verhalten bei Druckerhöhung	66
5.1.5	Literaturvergleich	67
5.2	Auswertung der ermittelten Parameter	69
5.2.1	Massenexponent	70
5.2.2	Parameter k.....	71
5.2.3	Abhängigkeit der Parameter untereinander	72
5.2.4	Anwendung auf ein reales Pressenkonzept	73
5.2.5	Anlagenvergleich	76
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	79
	ANHANG.....	81
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	88
	FORMELSYMBOLE	89
	LITERATURVERZEICHNIS	90

1 Einleitung und Problemstellung

Die Entwässerung der Papierbahn in der Pressenpartie der Papiermaschine spielt eine zentrale Rolle innerhalb der Papierherstellung. Die Effizienz der Pressenentwässerung bestimmt maßgeblich die erreichbare Produktionsleistung, sowie den spezifischen Energieeinsatz und somit die Produktionskosten.

Es ist besonders wichtig nach der Pressenpartie einen möglichst hohen Trockengehalt zu erreichen, da durch eine Erhöhung des Trockengehalts in der Presse der thermische Energieverbrauch verringert wird. Vor einem Neubau beziehungsweise Umbau der Pressenpartie ist es daher von größtem Interesse, den Trockengehalt nach der Presse möglichst genau zu kennen. Dazu ist es notwendig den eingesetzten Faserstoff hinsichtlich seiner Entwässerungseigenschaften zu charakterisieren.

Die gängigen Labormethoden sind nur bedingt in der Lage den erreichbaren Trockengehalt nach der Presse verlässlich abzuschätzen.

Um eine bessere Vorhersagegenauigkeit zu erreichen, speziell bei unbekanntem Stoffen, wurde zur Charakterisierung der Entwässerbarkeit von Faserrohstoffen in der Pressenpartie, im Hause Voith eine pneumatisch betriebene Laborpresseinheit FiberXPress entwickelt. Da die Presszeiten in der Presse einer Papiermaschine relativ kurz sind (< 100 ms), und somit der Pressvorgang nicht beobachtet werden kann, operiert FiberXPress in Flächengewichtsbereichen > 750 g/m². Durch die Erhöhung der Grammatur wird die Presszeit in den Sekundenbereich verschoben, und der Verlauf der Entwässerung kann beobachtet werden.

Obwohl sich die qualitative Aussagekraft der Laborergebnisse bereits mehrfach gezeigt hat, bleibt die quantitative Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität noch ein offener Punkt.

Um diesem Problem einen Schritt näher zu kommen, werden in dieser Arbeit ausgedehnte Versuchsserien bei 6 unterschiedlichen flächenbezogenen Massen (750-3000 g/m²) und 3 Drücken (3, 6 und 9 MPa) für 13 Faserstoffe mit dem Laborgerät FiberXPress durchgeführt. Dies soll mehr Informationen über die Grammatur- und Druckabhängigkeit im Flächengewichtsbereich des Laborgerätes liefern.

Nach einer Analyse und dem Vergleich der erhaltenen Messdaten sollen charakteristische Parameter eingeführt werden, die das Entwässerungsverhalten beschreiben. Zur Parametrierung der Messdaten werden vorab verschiedene Modelle aus der Literatur evaluiert, und ein geeignetes Modell zur Beschreibung der Messdaten ausgewählt.

Das Ziel ist, den Vergleich von verschiedenen Faserrohstoffen in eine kompakte und einfache Form zu bringen und somit die Übertragbarkeit auf reale Pressen vereinfachen.

2 Grundlagen der Pressenentwässerung

Nach der Blattbildung muss das Papierblatt noch weiter entwässert werden, bevor es thermisch getrocknet wird. Eine Erhöhung des Trockengehalts durch mechanisches Auspressen um 1% verringert den thermischen Energieverbrauch um etwa 5% und wird meist in eine Produktionserhöhung der Maschine um diese 5% umgesetzt [1].

Beim Pressen wird die Bahn zwischen zwei Walzen, die einen Liniendruck auf das Papier ausüben, hindurchgeführt. Das Wasser wird herausgepresst und durch Filze abgeführt. Zusätzlich wird der Abtransport des Wassers durch gerillte oder blindgebohrte Walzen unterstützt. Die Pressenpartie besteht meistens aus mehreren aufeinanderfolgenden Walzensystemen, wobei die Linienlast von Pressnip zu Pressnip höher wird.

2.1 Pressentheorie

Das heutige Verständnis des Nasspressens basiert auf der Arbeit von WAHLSTRÖM [2]. In seiner Theorie entsteht die treibende Kraft, der hydraulische Druck, der zum Entwässern benötigt wird durch die Kompression im Nip [3]. Er führte auch die Begriffe „pressure-controlled nip“ und „flow-controlled nip“ ein. Bei einem „pressure-controlled nip“ ist der Strukturdruck die entwässerungsbestimmende Größe, wohingegen bei einem „flow-controlled nip“ der hydraulische Druck bestimmend ist, und der Fließwiderstand die Entwässerung bestimmt. Bei dünnen holzhaltigen Papieren findet eher Entwässerung statt, die vom Strukturdruck abhängig ist. Die Entwässerung von Zellstoff oder Papieren mit hoher Grammaturn ist mehr im Bereich des „flow-controlled nip“ angesiedelt.

Eine detailliertere Darstellung der Vorgänge im Pressnip wurde 1969 von Nilsson und Larsson eingeführt. Sie teilten den Pressvorgang in 4 Phasen ein [1,4], welche in Abbildung 2-1 grafisch dargestellt sind.

1. Phase: Die erste Phase beginnt im Nipeinlauf. Papier und Filz werden zusammengedrückt und verdichtet. Dabei entsteht kein hydraulischer Druck, demnach fließt auch noch kein Wasser, Luft wird durch Filz und Papier gedrückt. Filz und Papier sind ungesättigt. In dieser Phase steigt der Trockengehalt nur geringfügig, der Druck wird für die Kompression der Faserstruktur verwendet.

2. Phase: In der zweiten Phase werden Filz und Papierbahn weiter komprimiert bis alle Luft aus der Bahn verdrängt ist. Nun baut sich aufgrund des Fließwiderstandes ein hydraulischer Druck auf, der Wasser aus dem Papier in den Filz presst. In der gesättigten Papierbahn teilt sich der Gesamtdruck in Strukturdruck und hydraulischen Druck auf. Der Druck auf die Filz- und Papierstruktur steigt während der gesamten Phase an. Wenn sehr viel Wasser herausgepresst wird, müssen die Filze durch gerillte Presswalzen unterstützt werden. Die zweite Phase endet in der Mitte des Nips.

3. Phase: Zu Beginn der dritten Phase fällt der Gesamtdruck. Der Strukturdruck steigt weiter an. An seinem Maximum erreicht das Papier den maximalen Trockengehalt. Die

Entwässerung wird auch nach der Mitte des Nips fortgesetzt, solange ein hydraulischer Druckgradient zwischen Papier und Filz besteht. Auch in dieser Phase wird die Papierbahn komprimiert, der Filz expandiert jedoch schon.

4. Phase: In der 4. Phase laufen Papier und Filz wieder aus dem Pressnip heraus, die Dicke steigt an und ein negativer Druck wird erzeugt. Durch das erzeugte Vakuum tritt Luft und Wasser in das Papier ein. Zusätzlich wirken noch kapillare Kräfte. In diese Phase tritt das Papier mit dem maximalen Trockengehalt ein und wird durch die Rückbefeuchtungseffekte wieder etwas feuchter. Die Rückbefeuchtung ist abhängig von der hygroskopischen und kapillaren Wiederaufnahme des Wassers durch das Papierblatt aus dem Filz. Sie wird erst durch die Trennung von Filz und Papier gestoppt. Die vierte Phase endet wenn der Strukturdruck gleich Null ist.

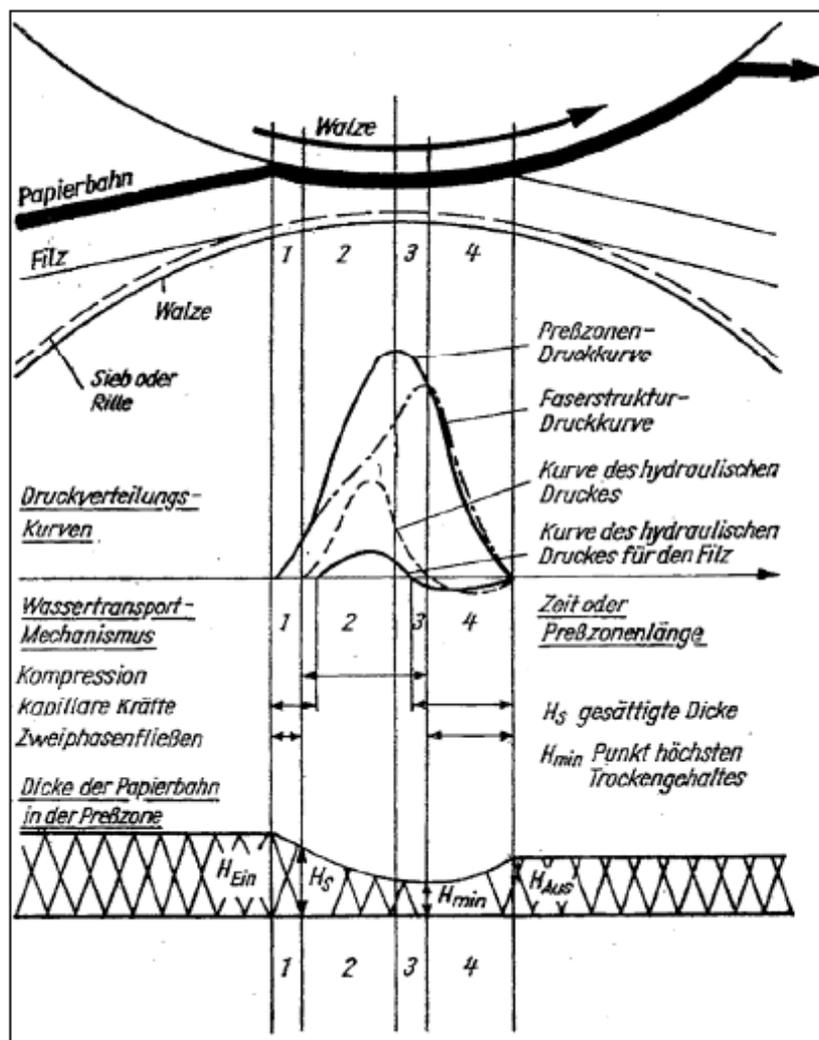


Abbildung 2-1: 4Phasen im Pressnip [1]

2.2 Einflussparameter beim Nasspressen

2.2.1 Pressimpuls und Druckprofil

Da die Papierbahn mit einer hohen Geschwindigkeit den Pressnip durchläuft bleibt nur eine sehr kurze Verweilzeit zwischen den Walzen.

Der Pressimpuls beschreibt den Zusammenhang zwischen Linienlast und Geschwindigkeit der Papiermaschine:

$$(1) \quad I [Pa \cdot s] = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt = p_{ave} * (t_2 - t_1) = \frac{F_L \cdot 60000}{w_{PM}}$$

$p_{ave}...$	<i>mittlerer Nipdruck [MPa]</i>	$p(t)...$	<i>Druck zum Zeitpunkt t [MPa]</i>
$F_L...$	<i>Linienlast [kN/m]</i>	$t_2...$	<i>Zeit, Nipende [s]</i>
$t_1...$	<i>Zeit, Nipanfang [s]</i>	$I...$	<i>Pressimpuls [Pa s]</i>
$w_{PM}...$	<i>Maschinengeschwindigkeit [m/min]</i>		

Es gilt: je höher der Pressimpuls, desto höher ist der Trockengehalt.

Limitierend dabei sind das Wasseraufnahmevermögen des Filzes und die Belastbarkeit des Papiergefüges [1,4].

Wenn der maximale spezifische Druck, der durch die Belastbarkeit der Blattstruktur begrenzt ist, erreicht wird kann eine Zunahme des Trockengehaltes durch eine Erhöhung des Pressimpulses nur über den Zeitfaktor erreicht werden [1]. Dies ist mit einer Schuhpresse möglich. Durch den hydraulisch angepressten Schuh können breite Pressnips erzeugt werden (bis zu 500 mm). Die Linienlasten können dann bis zu 1400 kN/m betragen, und sind um ein Vielfaches höher als bei Walzenpressen.

In Abbildung 2-2 sind die typischen Verläufe dieser zwei Pressen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Walzenpresse wesentlich höhere Drücke erreicht, aber eine viel kürzere Nipverweilzeit besitzt.

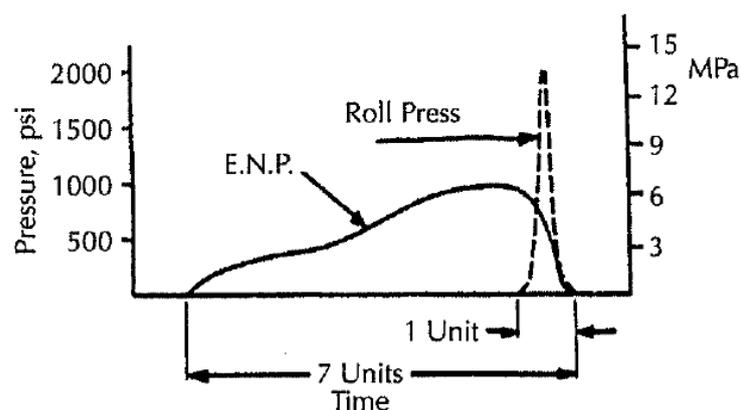


Abbildung 2-2: Pressenprofil einer Walzen- und Schuhpresse im Vergleich [4]

Die Form des Schuhs und die Länge der Presszone sind die wesentlichen Einflussgrößen einer Schuhpresse. Die Form des Druckanstieges, steiler oder flacher Druckgradient, nimmt Einfluss auf die Verdichtung und Dichteverteilung des Papierblattes. Dabei ergibt ein steiler Anstieg eine höhere Verdichtung der Papierbahn, bei einem flachen Anstieg

bleiben Porosität und Berstfestigkeit höher. Ein weiterer Vorteil ist, ein gleichmäßigeres Feuchtequersprofil durch die verlängerten Presszeiten [1].

Es ist von Stoff zu Stoff unterschiedlich, ob und an welcher Stelle der Pressenpartie eine Schuhpresse von Vorteil ist.

2.2.2 Eingangstrockengehalt

Der Eingangstrockengehalt beeinflusst den Trockengehalt nach dem Pressnip maßgeblich. Er ist zwar eine der bestimmenden Größen, ist aber von den vorhergehenden Prozessschritten abhängig und keine veränderbare Prozessvariable [4].

Ein Beispiel für den Einfluss des Eingangstrockengehalt auf den Ausgangstrockengehalt ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

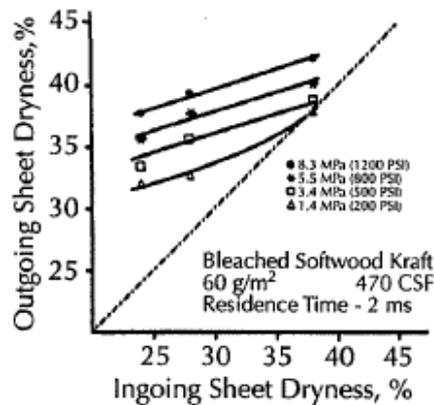


Abbildung 2-3: Eingangs- zu Ausgangstrockengehalt [4]

2.2.3 Temperatur

Die Bahntemperatur hat einen großen Einfluss auf die Entwässerungsleistung der Pressenpartie. Eine erhöhte Temperatur verringert die Viskosität und die Oberflächenspannung des auszupressenden Wassers. Somit kann es leichter durch die Faser- und Filzmatte abfließen. Zur groben Abschätzung gilt die Regel, dass eine Temperaturerhöhung der Papierbahn um 11°C, 1% Trockengehaltsgewinn bedeutet [4].

In Abbildung 2-4 ist sehr gut zu erkennen, dass mit höher werdender Temperatur der Trockengehalt ansteigt.

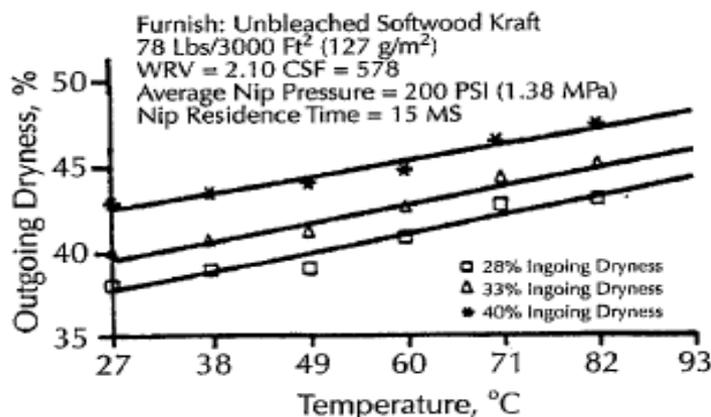


Abbildung 2-4: Temperaturverhalten [4]

Die Temperatur ist unabhängig von den anderen Pressvariablen. Eine Temperaturerhöhung kann zusätzlich zu den anderen angewendeten Maßnahmen der Trockengehaltssteigerung eingesetzt werden [13].

2.2.4 Flächenmasse

Die Grammatur ist ein weiterer Faktor, der die Entwässerungsleistung bestimmt und ist wie auch der Eingangstrockengehalt nicht frei wählbar.

Ein höheres Flächengewicht verlängert den Fließweg des Wassers in z-Richtung und somit auch die Zeit, die das Wasser benötigt, um vom Inneren des Blattgefüges bis zur Oberfläche des Blattes bzw. Filz zu gelangen. Nicht nur der längere Weg, sondern auch die erhöhte Wassermenge spielt dabei eine Rolle [5].

In Abbildung 2-5 ist der Einfluss der Grammatur auf den Trockengehalt dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei einer höheren flächenbezogenen Masse der Trockengehalt niedriger ist.

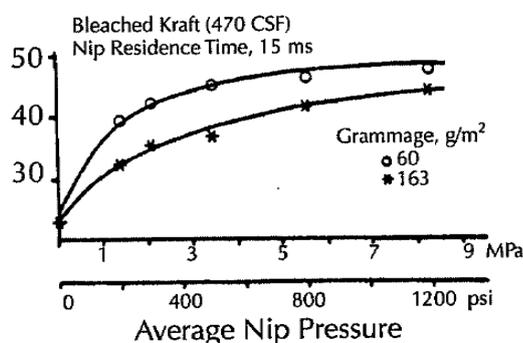


Abbildung 2-5: Einfluss der Grammatur auf den Trockengehalt [4]

Nicht unwesentlich ist der Einfluss der Rückbefeuchtung, der sich vor allem bei niedrigen flächenbezogenen Massen zeigt. Geht man davon aus, dass die Menge an Wasser die vom Filz zurück ins Papier gesaugt wird, konstant ist, macht sich dieser Anteil bei geringen Grammaturen mehr im Trockengehalt bemerkbar.

Wenn Laborwerte mit Maschinenwerten verglichen werden, ist darauf zu achten, dass die Papiermaschine bei einer Erhöhung der flächenbezogenen Masse langsamer läuft. Dies erhöht den Pressimpuls.

2.2.5 Blatt- und Rohstoffeigenschaften

Welcher Trockengehalt erreicht werden kann, ist auch sehr stark davon abhängig welcher Stoff entwässert wird.

Die Rohstoffeigenschaften die die Pressenentwässerung beeinflussen, können grob in folgende Bereiche aufgeteilt werden [14]:

- Faser- und Blattstruktur
- Porenstruktur der Fasermatte
- Quellung, Ladungszustand, Elektrolytgehalt und pH
- Füllstoffe, Retentionsmittel und sonstige Zusatzstoffe

2.2.5.1 Faser und Blattstruktur

Durch die mechanische Bearbeitung des Faserstoffs werden die Fasern gekürzt, flexibilisiert und fibrilliert. Die Mahlung hat eine negative Auswirkung auf die Entwässerungsleistung der Pressenpartie, ist aber zum Erreichen anderer Papiereigenschaften, wie zum Beispiel der Festigkeit, nötig. Der Mahlgrad wird entweder nach Schopper-Riegler (SR) oder nach Canadian Standard Freeness (CSF) gemessen. Mit zunehmender Mahlung wird es schwieriger das Papier zu entwässern, da mehr Feinstoffe entstehen und somit eine Verdichtung und Erhöhung des Fließwiderstandes erreicht wird.

In Versuchen mit einem ungebleichten Kraftzellstoff wurde gezeigt, dass die Formation keinen Einfluss auf den Trockengehalt nach der Presse hat. Die Stoffe mit unterschiedlichem Formationsindex zeigten ein nicht unterscheidbares Verhalten bei den Pressenversuchen mit einem dynamischen Pressensimulator [6].

Weitere Versuche dieser Arbeit zeigten, dass die Faserlänge eines ungebleichten Kraftzellstoffes (UBKP) ebenfalls keine Rolle in den Pressenversuchen spielte. Der hydraulische Druck steigt aber mit kürzer werdender Faserlänge an. Bei gleicher Grammatur wird das Blatt durch die kürzeren Fasern beim Pressen dichter, der Fließwiderstand steigt an und der hydraulische Druck wird höher [6].

Permeabilität und Kompressibilität sind weitere Eigenschaften, die vom Faserstoff abhängig sind. Wenn die Grammatur einen bestimmten Wert unterschreitet, ist die Permeabilität stark von ihr abhängig. Es wurde gezeigt, dass die Kompressibilität von Temperatur und Faserstoff abhängig ist [7]. Die Temperaturabhängigkeit kann einerseits durch die Viskositätsänderung des Wassers und andererseits durch das polymere Verhalten der Fasern erklärt werden. Auch das Expansionsverhalten einer Fasermatte nach dem Pressnip ist vom Stoff abhängig. Durch die Expansion nach dem Nip wird Wasser zurück in die Papierbahn gesaugt. Dies ist ein Grund für die Rückbefeuchtung. Beispielsweise dehnt sich Holzstoff schneller aus als Zellstoff, dadurch kann mehr Wasser aufgenommen werden und die Rückbefeuchtung ist höher, der Trockengehalt nach dem Nip niedriger [7].

2.2.5.2 Porenstruktur der Fasermatte

Die Porenstruktur ist zum Teil dafür verantwortlich, wie widerstandsfähig die Fasern gegen den aufgetragenen Druck sind. Große Poren kollabieren leichter als kleine Poren. Somit ist auch das Verhalten in der Presse von der Art des Porensystems abhängig [8].

Die Menge an Wasser in der Faserwand und die Porengrößenverteilung variiert mit der Faserart, Grad der Delignifizierung, der Art des Aufschlussverfahrens, pH und Elektrolytgehalt und der Art der Vorbehandlung (Mahlung, getrockneter/ungetrockneter Rohstoff) [3].

Um die Porengröße in Fasern zu bestimmen, haben CARLSSON ET AL. [9] Versuche mit unterschiedlich großen Polysaccharidpolymeren durchgeführt. Die Polymere besitzen eine definierte Molekülgröße und können nur in Faserporen größer als ihr Durchmesser eindringen. Wenn der Stoff gepresst wird, und Wasser aus kleineren Poren austritt, wird

die Lösung verdünnt. Es wurde festgestellt, dass die Polysaccharidkonzentration mit steigendem Trockengehalt sinkt, und dass zuerst Wasser aus großen Poren austritt. Nur für einen Porendurchmesser, der sich aus der Molekülgröße ergibt, von $\sim 8 \cdot 10^{-10}$ m sinkt die Konzentration nicht mit steigendem Trockengehalt. Weiters wurde gezeigt, dass mit der Mahlung die Porengröße sinkt.

Andere Versuche, die ebenfalls auf der gleichen Idee basieren, zeigten, dass bei geringen Drücken (0-2 MPa) das meiste Wasser aus den Zwischenräumen kommt aber auch schon aus den Zellwänden. Mit höher werdendem Druck wird weniger Wasser aus den Zwischenräumen der Fasern gepresst. Das Wasser kommt dann nur noch aus den Zellwänden [10].

2.2.5.3 Quellung, Ladungszustand, Elektrolytgehalt und pH

Wenn Fasern mit Wasser in Kontakt kommen, wird Wasser in die Poren aufgesogen und durch die Kapillaren absorbiert. Es wird in die Hohlräume, Poren und in das Lumen aufgenommen. Wenn Wasser in die kleinsten Poren eindringt, nimmt die Faser an Volumen zu [1].

Da Fasern negativ geladen sind, wird die Quellung durch das Vorhandensein von Kationen verstärkt. Deshalb ist bei einem leicht erhöhten pH-Wert die Quellung stärker.

Die negative Ladung der Faser wird durch Hydroxylgruppen, Carboxylgruppen, Sulfonsäuregruppen und phenolischen Strukturen hervorgerufen. Wie hoch diese negative Ladung ist, hängt von der Fasergewinnung und der Art der Behandlung während der Stoffaufbereitung ab. Die Ladungsdichte kann über einen Ionentausch ermittelt werden.

Für die Mahlung ist es wichtig, gequollene Faser zu haben, da so eine stärkere Fibrillierung auftritt und eine größere spezifische Oberfläche erreicht wird. In der Blattbildung können so mehr Kontaktflächen geknüpft werden [14].

Für die Entwässerung in der Presse ist die Quellung der Fasern aber als Nachteil zu sehen. Es befindet sich mehr Wasser in den Zellwänden, das nur schlecht entfernt werden kann. Bei Versuchen hat sich gezeigt, dass durch das Hinzufügen von Quellungsmitteln der Trockengehalt nach der Presse geringer ist [6].

2.2.5.4 Füllstoffe, Retentionsmittel und sonstige Zusatzstoffe

Generell wird bei der Zugabe von Füllstoffen ein höherer Trockengehalt erreicht. Wenn der Füllstoff nicht zwischen und an den Fasern angelagert ist, sondern in den Fasern, wird ein noch größerer Trockengehalt erzielt. Das Einlagern des Füllstoffes ins Lumen erfolgt durch eine Fällungsreaktion zwischen Natriumcarbonat und Calciumchlorid. Das Wasserrückhaltevermögen gibt Aufschluss darüber, wie viel Wasser sich in der Faser befindet. Bei ungefüllten Stoffen ist dieser Wert am höchsten, bei Stoffen die den Füllstoff in der Faser enthalten am niedrigsten. Der Füllstoff sitzt also in den Poren in denen sich normalerweise das Wasser aufhält [11].

Die Zugabe von Chemikalien wurde unter anderem von KARTOVAARA [12] untersucht. Die Versuche wurden mit zwei Stoffen durchgeführt, die Chemikalienzugabe erfolgte im Blattbildner, anschließend wurde mit einer Versuchspapiermaschine gepresst. Eine positive Wirkung auf den Trockengehalt ist mit PEI und kationischer Stärke erzielt worden, vor

allem bei feinstoffreichen Altpapiersorten. Bei schwach gemahlene gebleichten Zellstoffen war der Effekt kaum zu sehen. Nachteilig wirkten sich nicht-ionisch oder anionische Chemikalien aus.

2.2.6 Weitere Einflussgrößen

Weitere wichtige Einflussgrößen die hier aber nur kurz angesprochen werden, sind die Walzenoberfläche, sowie der Einfluss des Filzes auf die Pressenentwässerung.

Die Walze ist aus rostfreiem Stahl mit einem mehr oder weniger harten Überzug. Beispiele für Beschichtungsmaterialien sind: Hartmetall, Keramik, Kuststoffharz, Hartgummi oder Polyurethan. Die Härte der Walzenoberfläche nimmt einen Einfluss auf das Pressenprofil und wirkt sich bei Stoffen deren Entwässerung „pressure-controlled“ verläuft etwas stärker aus [4].

Ein weiterer wichtiger Punkt in Bezug auf die Walzenoberfläche ist die Art der Bearbeitung. Mit höher werdender Maschinengeschwindigkeit muss immer mehr Wasser in kürzester Zeit abtransportiert werden. Eine Walze mit glatter Oberfläche ist dazu nicht in der Lage. Deshalb sind die meisten Walzen mit Rillen oder blindgebohrten Löchern ausgeführt. Das Wasser das aus dem gesättigten Filz kommt, kann aufgenommen werden und wird in weiterer Folge entweder abgeschleudert oder wird, wenn der Filz expandiert, von diesem aufgenommen [1].

Der Filz ist das Bindeglied zwischen Papier und Walze und hat primär die Aufgabe das Wasser abzuführen. Der verfügbare Hohlraum in komprimierten Zustand gibt Auskunft über das Wasseraufnahmevermögen im Nip, und sollte klarerweise so hoch wie möglich sein. Weiters ist die Feinheit des Filzes ausschlaggebend für den zu erreichenden Trockengehalt der Papierbahn. Ist es sehr grob bilden sich lokal Spitzendrücke aus und das Wasser weicht in Zonen mit geringeren Drücken aus. Ein feiner Filz vergleichmäßig den aufbrachten Druck und erzielt einen höheren Trockengehalt [4].

Die Eingangsfeuchte des Filzes spielt keine große Rolle. Es wurden eine Vielzahl von Experimenten durchgeführt, die alle zu dem Ergebnis kamen, dass die Eingangsfeuchte des Pressfilzes den Trockengehalt nach der Presse in realen Situationen um weniger als 1% beeinflusst [4]. Dass dies so ist, wird durch gerillte bzw. blindgebohrte Walzenoberflächen ermöglicht.

Während der Laufzeit eines Pressfilzes sinkt die Permeabilität, der Trockengehalt nach der Presse sinkt ebenso. Wenn der hydraulische Druckabfall zu hoch wird, ist das Ende der Laufzeit erreicht, und der Filz muss getauscht werden [4].

2.3 Stand der Technik zur Rohstoffcharakterisierung hinsichtlich Pressenentwässerung

2.3.1 Schopper-Riegler (SR) und Canadian Standard Freeness(CSF)

Die Standardlabormessung zur Überprüfung des Entwässerungsverhaltens ist die Schopper-Riegler Methode, beziehungsweise im nordamerikanischen Raum der Canadian

Standard Freeness Test. Diese Versuche sind schon seit rund 100 Jahren bekannt. Beim SR Test erhält man bei Stoffen, die schnell eine Fasermatte aufbauen und somit einen geringen Wasserdurchfluss aufweisen, einen hohen SR-Wert. Für den Canadian Standard Freeness Test ist dies genau umgekehrt [4].

Hauptsächlich wird der SR/CSF-Wert benutzt, um einen Anhaltswert für den Mahlfortschritt zu haben. Im Zuge der Mahlung wird die Faser verkürzt und Fibrillen bilden sich aus. So kann sich ein dichteres Netzwerk ausbilden und die Entwässerung verläuft langsamer.

Um Aussagen über die Entwässerungseigenschaften zu treffen, ist die Messung des SR-Wertes bzw. CSF-Wertes nicht geeignet, da es vorkommt, dass bei unterschiedlichen SR-Werten derselbe Trockengehalt erreicht wird [13].

Dies hat sich auch in dieser Arbeit gezeigt. Im Diagramm 2-1 sind die Trockengehalte, die im Zuge dieser Diplomarbeit mit der pneumatischen Presse gemessen wurden, für verschiedene Stoffe aufgetragen. Für die Darstellung wurde eine Grammatur von 1000 g/m², eine Presszeit von 200 s und ein Druck von 6 MPa ausgewählt. Auf der x-Achse ist der Schopper-Riegler Wert aufgetragen, der erreichte Trockengehalt auf der y-Achse.

Betrachtet man alle Stoffe so ist kein Trend erkennbar. Innerhalb eines Stoffes, wie zum Beispiel bei der Mahlreihe des Stoffsystems Langfaser/Deinked Pulp (LF/DIP) ist aber eine Abnahme des Trockengehalts mit steigenden SR-Wert erkennbar.

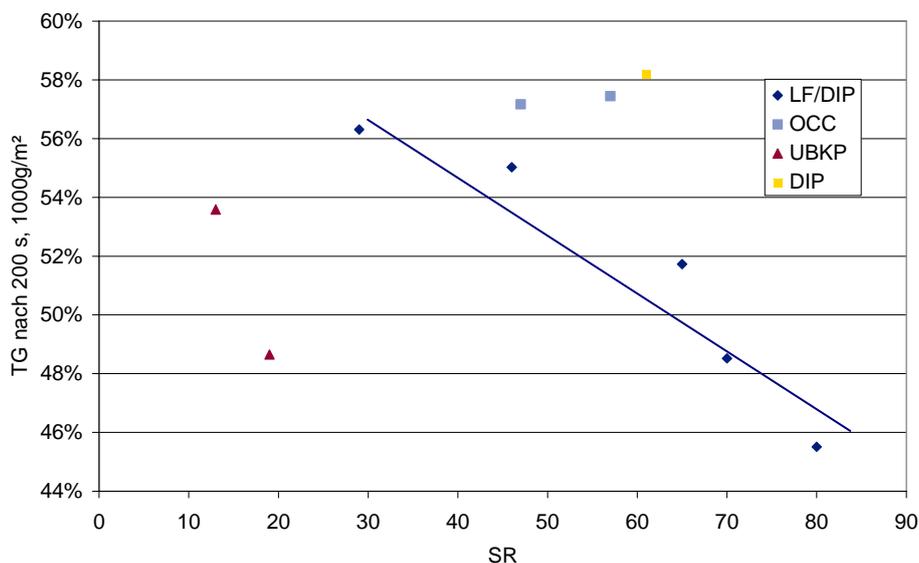


Diagramm 2-1: Abhängigkeit zwischen Trockengehalt und SR

2.3.2 Wasserrückhaltevermögen (WRV)

In der Presse ist der Wert des Wasserrückhaltevermögens ein weitaus wichtigeres Maß für die Beschreibung der Entwässerungseigenschaften eines Faserstoffes. Bei dieser Standardlabormethode wird eine genau definierte Menge Faserstoff in ein Zentrifugenröhrchen gegeben und dann bei einer bestimmten Schleuderschleuderzahl und Zeit zentrifugiert. Durch das Abwägen der Probenmassen vor und nach dem Zentrifugieren wird der WRV-Wert berechnet. Zur Durchführung im Labor gibt es verschiedene

Vorschriften, die sich in Probengewicht und Schleuderzahl unterscheiden. In dieser Arbeit wurde für die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens die Arbeitsanweisung von Voith Paper Ravensburg verwendet. Prinzipiell wird dabei nach der Zellcheming-Methode vorgegangen. Die Beschleunigung wird auf 3000 g eingestellt und die Schleuderzeit auf 17 min.

Die Untersuchungen von BUSKER [13] haben gezeigt, dass zwischen dem Wasserrückhaltevermögen und dem Trockengehalt nach der Presse ein Zusammenhang besteht. In Abbildung 2-6 ist der Zusammenhang zwischen Trockengehalt und Wasserrückhaltevermögen dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass eine Abhängigkeit zwischen den Werten besteht. Die Aussagekraft über den errichteten Trockengehalt mit Hilfe des WRV ist aber nicht eindeutig.

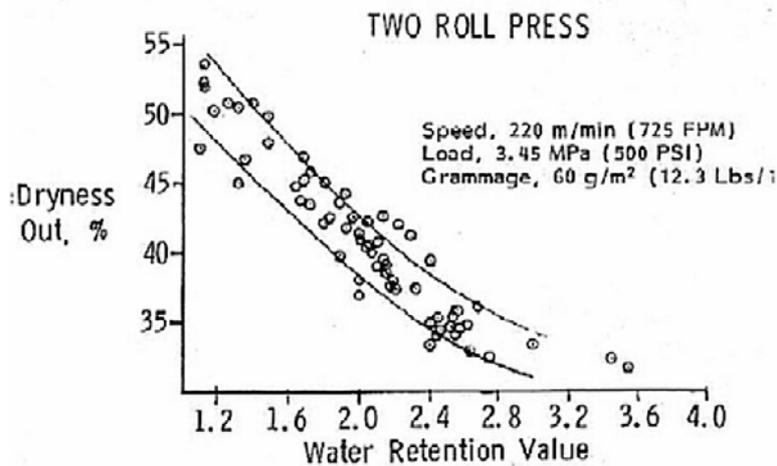


Abbildung 2-6: Trockengehalt über Wasserrückhaltevermögen [13]

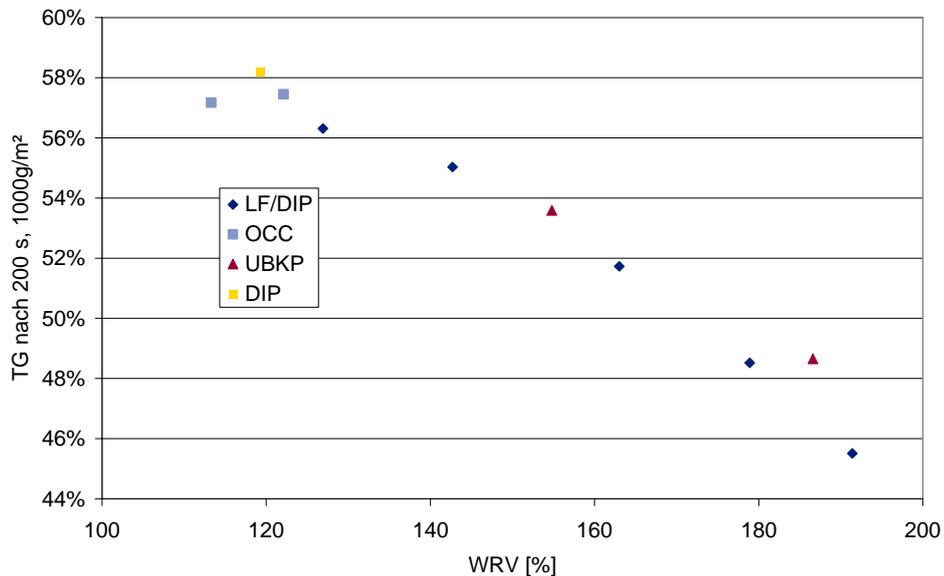


Diagramm 2-2: Trockengehalt über WRV

Der Zusammenhang zwischen Trockengehalt und WRV hat sich auch für die Messungen mit der pneumatischen Presse bestätigt. Im Diagramm 2-2 sind die erreichten Trockengehalte der 1000 g/m² Messungen nach einer Pressdauer von 200s und 6 MPa über

das Wasserrückhaltevermögen aufgetragen. Im Gegensatz zum Diagramm 2-1: Abhängigkeit zwischen Trockengehalt und SR“ ist eine deutliche Abhängigkeit erkennbar.

2.3.3 Centrifugal Compression Value (CCV)

Bei dieser Methode handelt es sich um eine Modifikation des Wasserrückhaltevermögens. Der Unterschied liegt darin, dass der Faserstoff im Zentrifugenröhrchen zusätzlich mit einem Gewicht beschwert wird. Bei den Versuchen kann Beanspruchungszeit, Beschleunigung, und das Probengewicht variiert werden. Die so erreichten Drücke sind ähnlich denen einer realen Presse, die Pressdauer ist aber länger. Der Test des Centrifugal Compression Value wurde dafür entwickelt, um den Zusammenhang zwischen Faserstruktur und Faserwandentwässerung zu beobachten. Die CCV-Untersuchung ist in der Lage verschiedene Faserstoffe hinsichtlich ihrer Entwässerung zu unterscheiden, sie gibt aber keine Auskunft über den erreichbaren Trockengehalt nach der Presse [14].

2.3.4 Hydraulische Presse

Ein Beispiel einer hydraulischen Presse ist das Prüfgerät von MTS Systems Corporation. Es kann und wird für sehr vielfältige Anwendungen verwendet. Mit diesem Prüfstand ist es möglich, das mechanische Verhalten von Werkstoffen zu ermitteln.

Es besteht aus einem starren und einem beweglichen Stempel. Der obere Stempel wird hydraulisch betrieben, so können schnell höchste Drücke bereitgestellt werden. Für die Verwendung zur Nachstellung einer Presse, muss der untere Stempel mit einem durchlässigen Material versehen werden.

Der Vorteil des MTS-Testers ist, dass reale Pressenprofile und Drücke simuliert werden können. Es können auch Filze verwendet werden. Ein Nachteil ist aber, dass nur der Endtrockengehalt nach dem aufgetragten Pressimpuls bestimmt werden kann. Somit sind keine Informationen zum Entwässerungsverlauf der Stoffe vorhanden.

Timo Saukko beschäftigte sich in seiner Master Thesis intensiv mit der Auswahl des unteren Stempelmaterials. Er stellte fest, dass eine glatte Oberfläche notwendig ist, um Stoffe miteinander vergleichen zu können. In den Versuchen wurden der Einfluss der Pressimpulsform untersucht. Es zeigte sich, dass bei einer Rollenpresse die „wet density“ höher ist als bei einer Schuhpresse [15].

Nicolas Guy hat in seiner Diplomarbeit Pressenversuche mit dem MTS-Tester durchgeführt [16].

2.4 Mathematische Modelle zur Beschreibung des Entwässerungsvorganges

2.4.1 Viskoelastisches Modell (Kelvin-Body)

Der Ansatz des Modells beginnt mit der Betrachtung der Komponenten Wasser, Faser und Luft als miteinander agierende Stoffe. Sie werden als viskose und elastische Elemente beschrieben und als paralleles Feder-Dämpfer System dargestellt. Um den Dämpfer, beziehungsweise den Widerstand der Fasermatte, zu beschreiben wird das Gesetz von Darcy verwendet. Daraus ergeben sich die zwei Parameter C' und τ , die den

Entwässerungsvorgang beschreiben. Dabei steht τ für die benötigte Zeit um 63,2% der maximal möglichen Trockengehaltsänderung zu erreichen. Der Wert von 63,2% folgt aus dem exponentiell ansteigenden Prozesses, der sich mit $y=y_0*(1-e^{-t/\tau})$ beschreiben lässt. Wird $t=\tau$ eingesetzt so ergibt sich ein τ von 63,2%. C' gibt die maximale Trockengehaltsänderung an. Beide Parameter sind charakteristisch für die Fasermatte und druckabhängig [17,18].

$$(2) \quad mr = mr_0 \cdot \left[1 - \frac{p}{C'} (1 - e^{-t/\tau}) \right]$$

$mr...$ moisture ratio [1]

$t...$ Verweilzeit im Nip [s]

$mr_0...$ Anfangs moisture ratio [1]

$p...$ Nip Druck [Pa]

$\tau...$ Entwässerungszeitkonstante [s]

$C'...$ scheinbar kompressiver Elastizitätsmodul [Pa]

2.4.2 Stoffentwässerung im Walzenspalt

GUDEHUS [19] hat versucht die Vorgänge im Pressnip auf ihre physikalischen Grundprozesse zurückzuführen, um so die Berechnung des Trockengehalts am Nipauslauf zu ermöglichen.

Für die Pressenformel wird angenommen, dass sich die auspressbare Wassermenge in kompressiblen Makroporen befindet. Für die Berechnung des Niptrockengehalts ist es notwendig Starttrockengehalt, Pressimpuls, Stofftemperatur und Grenztrockengehalt zu kennen. Die Pressenkennzahl beschreibt die Stoffbeschaffenheit und den Filz. Der Grenztrockengehalt ist der mit hohem Pressdruck und langer Pressdauer nicht überschreitbare Trockengehalt. Diesen kann man entweder experimentell bestimmen oder mit einer Annäherung über das Wasserrückhaltevermögen (WRV) berechnen.

$$(3) \quad c_N = \frac{c_L \cdot c_i + PK \cdot (c_L - c_s) \cdot I}{c_L^2 + PK \cdot (c_L - c_s) \cdot I} \cdot c_L$$

$$PK = W \cdot PK_0 \cdot \left(1 + \frac{T}{30} \right)^{1,34}$$

$$c_L \approx \frac{1,2}{1 + WRV}$$

$c_N...$ Niptrockengehalt [%]

$T...$ Temperatur [°C]

$c_L...$ Grenztrockengehalt [%]

$W...$ Grammaturl [kg/m²]

$PK...$ Pressenkennzahl [m²/Ns]

$c_s...$ Starttrockengehalt [%]

$PK_0...$ temperaturabhängige Pressenkennzahl

$I...$ Pressimpuls [Pa s]

2.4.3 Limiting-Consistency Modell

Ein anderes Modell, das auf der Carman-Kozeny-Gleichung (Formel (4)) und der Darcy-Gleichung (Formel (5)) beruht, ist das Limiting-Consistency Modell [21]. Es wird davon ausgegangen, dass jedes Entwässerungssystem bei konstantem Druck einen limitierenden Feststoffgehalt erreicht.

$$(4) \quad \frac{\Delta p}{L} = K \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \theta_{s,v}^2 \cdot \eta \cdot w$$

Δp ... Druckdifferenz [Pa]

η ... dynamische Viskosität [Pa s]

ε ... Porosität [1]

$\theta_{s,v}$... volumsbezogene spezifische

Oberfläche [m²/m³]

L ... Faserbett Dicke [m]

w ... Geschwindigkeit [m/s]

K ... Kozeny-Faktor [1]

$$(5) \quad Q = \frac{\kappa \cdot \Delta p_h \cdot A}{l \cdot \eta}$$

η ... dyn. Viskosität [Pa s]

l ... durchströmte Länge [m]

Q ... Volumenstrom [m³/s]

A ... Querschnittsfläche [m²]

Δp_h ... hydraulische Druckdifferenz [Pa]

κ ... Permeabilität [m²]

Um auf die Formel des Limiting-Consistency model zu kommen, werden folgende Annahmen getroffen:

κ in der Darcy Gleichung, Formel (5), wird mit Hilfe der Carman-Kozeny Gleichung ausgedrückt.

$$\kappa = \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2 \cdot \theta_{s,v}^2 \cdot K}$$

Das Wasser das nicht entfernt werden kann, wird mathematisch als Teil der Faser angesehen, somit folgt für die Porosität:

$$\varepsilon = 1 - \frac{c}{c_L}$$

Der Fließweg wird über den gesamten Pressvorgang als konstant angenommen. Somit ergibt sich:

$$\int_0^l dx = \frac{W}{A \cdot \rho \cdot c_L}$$

Formel (5) wird anders angeschrieben: $\frac{dV}{dt} = \frac{\kappa \cdot \Delta p_h \cdot A}{l \cdot \eta} = A \cdot w$ und das Volumen in Form

einer Konsistenz eingesetzt: $V = \frac{W}{\rho \cdot c}$.

$$(6) \quad c_N = c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \cdot I}{\eta \cdot W^2} + \frac{1}{(c_L - c_s)^2}}}$$

c_N ... Niptrockengehalt [%]

η ... dynamische Viskosität [Pa s]

c_L ... Grenztrockengehalt [%]

W ... Grammaturs [kg/m²]

k ... Parameter k [kg²/m⁴]

c_s ... Starttrockengehalt [%]

I ... Pressimpuls [Pa s]

$$(7) \quad k = \frac{\rho^2}{K \cdot \theta_{s,v}^2}$$

Die experimentell zu bestimmenden Parameter sind c_L und k . Sie beschreiben die Presse, Filze, Stoffeigenschaften. Der Parameter k ist abhängig vom Kozeny Faktor, der spezifischen Oberfläche und Dichte [20,21].

Im Folgenden wird für dieses Modell auch die Abkürzung LCM oder LC-Modell verwendet.

2.4.4 Decreasing-Permeability Model

Dieses Modell nach KEREKES und McDONALD [22,23,24] basiert auf der Theorie, dass der ganze aufgebrachte Druck für die Entwässerung der Papierbahn sorgt. Mit steigendem Druck steigt die Entwässerung. Es werden durch die Verdichtung auch Fließwege geschlossen und somit der Fließwiderstand erhöht [25].

Es wurde angenommen, dass der Filz den Druck gleichmäßig überträgt. Das Modell basiert ebenfalls auf der Carman-Kozeny Gleichung (4), die den Fluss durch einen inkompressiblen, undurchlässigen Festkörper beschreibt, und der Darcy Gleichung(5).

Weiters wird angenommen, dass die Porosität und die Dicke des Faserbettes mit steigendem Trockengehalt sinken. Das Modell mit dem Rückbefeuchtungsterm in Formel (8) beschreibt den Trockengehalt als Funktion von Eingangstrockengehalt, Pressimpuls, Flächengewicht und der Temperatur, die über die Viskosität eingeht. Die Parameter a und n sind aus Versuchen zu bestimmen. Sie beschreiben das Pressenkonzept, Papier und Filzeigenschaften und die Kompressibilität.

Im Folgenden wird für dieses Modell auch die Abkürzung DPM verwendet.

$$(8) \quad mr = mr_0 \cdot \left(1 + \frac{a \cdot n \cdot mr_0^n \cdot I}{\nu \cdot W^2} \right)^{-1} + \frac{R}{W}$$

$mr...$	<i>moisture ratio [1]</i>	$\nu...$	<i>kinematische Viskosität [m²/s]</i>
$mr_0...$	<i>Anfangs moisture ratio [1]</i>	$W...$	<i>Grammatur [kg/m²]</i>
$a...$	<i>Permeabilitätskoeffizient [kg/m]</i>	$I...$	<i>Pressimpuls [Pa s]</i>
$n...$	<i>Kompressibilitätsfaktor [1]</i>	$R...$	<i>Rückbefeuchtung [kg/m²]</i>

2.4.5 Modell nach Holstege

Dieses Modell verwendet das Konzept von Luey, das den „flow controlled“ Bereich beschreibt [26]. Anders als bei den meisten anderen Modellen, wird das Gesetz von Hagen-Poiseuille für die Modellierung verwendet. HOLSTEGE drückt die Beziehungen zwischen Porendurchmesser und -länge und das Verhältnis der Entwässerungsfläche, die schon von Luey eingeführt wurden, in den Termen des Trockengehalts und des limitierenden, kritischen Trockengehalts aus [26].

Dadurch ergibt sich eine logarithmische Beziehung zwischen Trockengehalt und Impuls.

$$(9) \quad c_N = c_L - (c_L - c_s) \cdot \exp\left(-\frac{b \cdot I}{c_L \cdot W^2 \cdot \eta}\right)$$

$c_N...$	Niptrockengehalt [%]	$\eta...$	dynamische Viskosität [Pa s]
$c_L...$	Grenztrockengehalt [%]	$W...$	Grammatur [kg/m ²]
$b...$	Parameter b [kg ² /m ⁴]	$c_s...$	Starttrockengehalt [%]
$I...$	Pressimpuls [Pa s]		

2.4.6 Differentiated Permeability Surface Layer (DPSL)

Diese Theorie basiert zu einem Teil auf der Arbeit von VOMHOFF [7] und dessen Theorie, dass ein komplett ebener Filz keine Entwässerungsleitung hat, weil die Permeabilität unter den Druckstellen des Filzes zu niedrig ist.

Beim DPSL wird davon ausgegangen, dass sich die komprimierten Regionen nach einer gewissen Tiefe wieder vergleichmäßigen. Es wird angenommen, dass die komprimierte Fläche unter dem Filz einem Kegel entspricht dessen Winkel nur von den mechanischen Eigenschaften des Stoffs und dem Pressdruck abhängig ist. In Abbildung 2-7 ist die vereinfachte Theorie dargestellt. Die schwarzen Bereiche sind die durch den Filz komprimierten Gebiete, sie haben einen hohen Trockengehalt und eine Permeabilität nahe Null. Die hellblauen Bereiche stellen Zonen mit niedrigem Druck, niedrigerem Trockengehalt und hoher Permeabilität dar. Die Dicke der DPSL, nach dieser wieder eine gleichmäßige Druckverteilung herrscht, wird durch die unterbrochene Linie dargestellt. Für den größten Filz wird das erst an der Unterseite des 60 g/m² Papiers erreicht [27].

Durch das Absinken der Permeabilität wird die Entwässerungsleistung verringert.

Diese Modellvorstellung kann auch als ein anderer bzw. weiterer Ansatz zur Beschreibung der Rückbefeuchtung dienen.

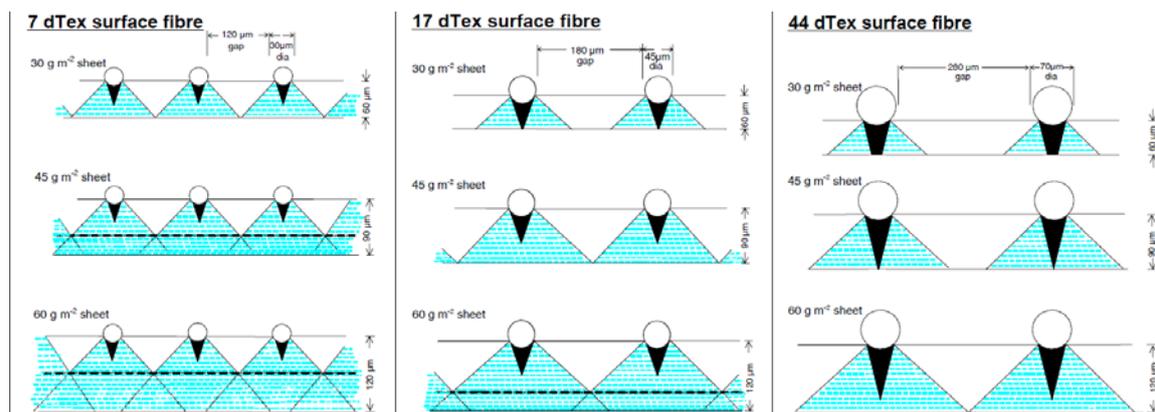


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung des DPSL für verschiedene Grammaturen und Filztypen[27]

3 Methodisches

In diesem Teil der Arbeit wird auf die praktische Durchführung eingegangen. Zu Beginn werden das verwendete Laborgerät sowie die Versuchsdurchführung näher beschrieben. Weiters enthält dieses Kapitel einen Überblick über die verwendeten Stoffe und die Versuche zur Bestimmung der Randbedingungen und Einflussgrößen des Gerätes.

3.1 Beschreibung der pneumatischen Presse

Die pneumatische Presse FiberXPress, kurz FXP, wurde entwickelt, um das Entwässerungsverhalten während des Pressvorganges verschiedener Rohstoffe genauer zu untersuchen.

Da der Pressvorgang in der Papiermaschine im Bereich von Millisekunden abläuft, ist das Pressverhalten nur schwer zu beobachten. Darum wird in der FiberXPress die flächenbezogene Masse erhöht. So verlagert sich die benötigte Zeit für die Entwässerung in den Sekundenbereich, und kann beobachtet werden.

Ein Vorteil der pneumatischen Betriebsweise ist, dass das Gerät so transportabel bleibt. Ein Druckluftanschluss ist in einem Labor meistens ohnehin vorhanden, oder kann durch einen Kompressor bereitgestellt werden.

Anhand der Abbildung 3-1 lässt sich die Funktion der FiberXPress leicht erklären. Mit der angelegten Druckluft, die ölfrei trocken und gefiltert sein soll, wird der Kolben (rot) nach unten gedrückt. Der Kolben der auf die Probe drückt ist kleiner, so wird ein höherer Druck auf die Probe erzeugt. Der Stoff wird zwischen der glatten Metalloberfläche des Kolbens und einem feinem Metallsieb gepresst. Dieses Metallsieb liegt auf der Lochplatte und gewährleistet den lateralen Fluss. Während des Pressvorganges wird das ausgepresste Wasser gewogen, so erhält man nicht nur den Endtrockengehalt, sondern den gesamten Verlauf der Entwässerung. Dies ist ein entscheidender Vorteil der FiberXPress gegenüber anderen Labormethoden.

Im oberen Teil der FiberXPress (dunkelblau) befindet sich die Elektronik. Der A/D-Wandler empfängt und steuert die Signale vom Computer und sendet die Signale der Waage und des Druckreglers an den Rechner.

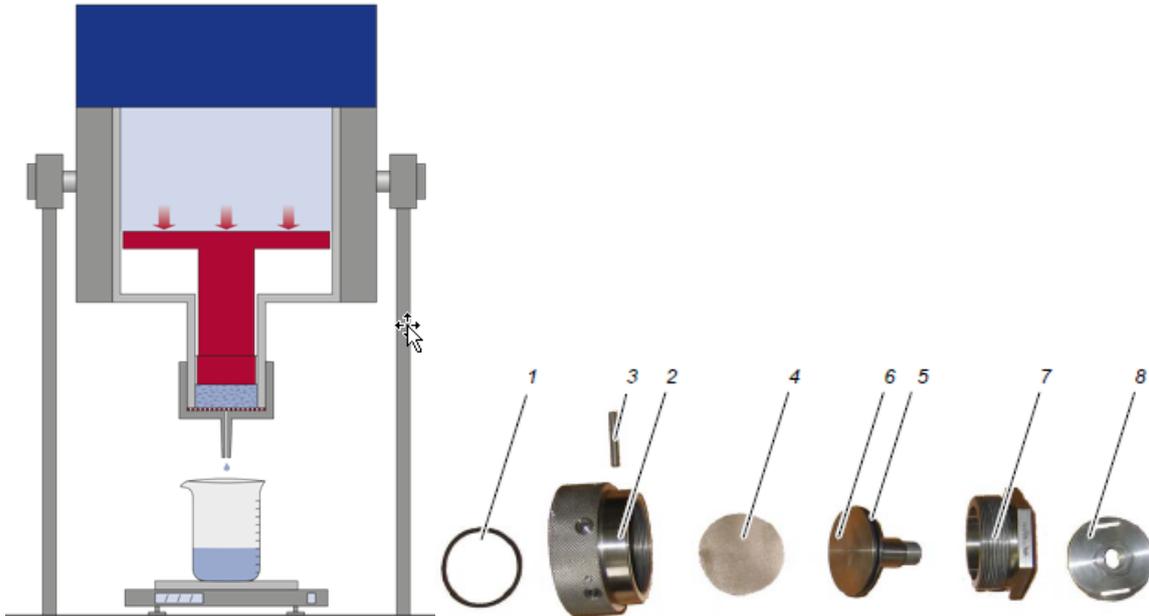


Abbildung 3-1: Skizze der FiberXPress und Aufbau des Verschlusssteils [28]

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1 Flachdichtung | 5 O-Ring |
| 2 gerändelte Verschlusschraube | 6 Lochplatte |
| 3 Stahlstifte zum Festziehen | 7 Sechskantverschlusschraube |
| 4 Metallsieb | 8 Gefäßhalter (optional) |

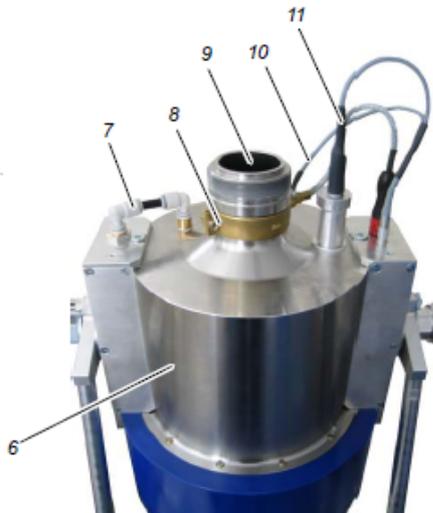
Die Betriebsdaten der FiberXPress sind in Tabelle 3-1 dargestellt:

Tabelle 3-1: Betriebsdaten Allgemein [28]

Bezugsgröße	Wert
Druck	0,05-9,5 MPa
Dauer eines Druckvorgangs	5-1000 s
Probenmenge	bis zu 200 ml
Flächenbezogene Masse	1000 g/m ² -3000 g/m ²
Temperierbare Probenkammer	Raumtemperatur bis 80°C
Massenmessung	0-620 g

Da in dieser Arbeit näher auf die Grammaturabhängigkeit eingegangen wird, wurde der Bereich der flächenbezogenen Masse etwas nach unten erweitert.

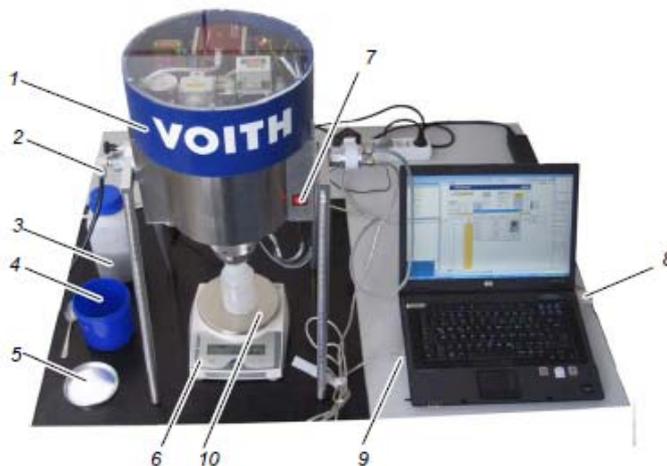
Durch den Schwenkmechanismus lässt sich die Presse leicht in Einfüll- und Messposition bringen. In Abbildung 3-2 befindet sich das Gerät in der Einfüllposition. In dieser Darstellung sind weitere Elemente der FiberXPress erkennbar. Mit Hilfe des Gegendrucks fährt am Ende der Messung der Zylinder wieder in seine Ausgangsposition zurück. Wenn Stoffproben mit erhöhter Temperatur gemessen werden, so ist es zuvor notwendig, den Stoff in einem Wasserbad vorzuwärmen. Die Heizschelle sorgt dafür, dass das Metall auf Temperatur kommt und der Stoff während der Messung nicht abkühlt. Mithilfe eines potentiometrischen Wegaufnehmers wird der Verlauf der Dicke aufgezeichnet.



- 6 Niederdruckzylinder
- 7 Druckluftzufuhr für Gegendruck
- 8 Heizschelle
- 9 Einfüllöffnung für Probenkammer
- 10 Temperatursensor
- 11 Wegaufnehmer

Abbildung 3-2: FXP in Einfüllposition mit geöffneter Probenkammer [28]

In Abbildung 3-3 ist der Messaufbau zu sehen. Hier befindet sich das Gerät wieder in der Messposition. Die Waage ist vom Typ Mettler-Toldeo PL602S, die eine Ablesegenauigkeit von 0,01 g aufweist. In dieser Darstellung ist auch der Elektronikteil gut zu erkennen.



- 1 FiberXPress
- 2 Druckluftzufuhr
- 3 Faserstoff
- 4 Vorratsbehälter für Faserstoff
- 5 Tasse für trockenes Pellet
- 6 Waage
- 7 Schalter und Indikator für Heizung
- 8 Serielles Kabel für Waagensignal
- 9 USB Kabel für Signale von der FXP
- 10 Wasserauffangbehälter

Abbildung 3-3: Messaufbau [28]

3.2 Beschreibung der Versuchsdurchführung

3.2.1 Durchführung einer Messung

Die von Firmen kommenden Proben werden bei circa 30% Stoffdichte im Kühlschrank gelagert. Für die Messung wird eine Stoffdichte von rund 3% benötigt, daher müssen sie vorher verdünnt werden. Dies geschieht durch Einweichen von mindestens einer halben Stunde und anschließendem Rühren.

Wenn der Stoff soweit vorbereitet ist, kann man mit der eigentlichen Messung beginnen. Nach dem Öffnen des Excel Files wird initialisiert und die zuvor bestimmte Stoffdichte und das gewünschte Flächengewicht eingetragen. Mit einer Schöpfkelle wird etwas vom gut durchgemischten Stoff in ein Becherglas gegeben und mit einem Löffel auf die Waage gestellt. Dann muss auf die Schaltfläche „Pulp vor Befüllung“ gedrückt werden und die

Menge an einzuwiegendem Stoff wird angezeigt. Beim Einwiegen ist wieder sehr darauf zu achten, immer gut umzurühren und keinen Stoff zu verschütten. Nach Betätigung der Schaltfläche „Pulp nach Befüllung“ wird der Verschluss mit Lochplatte und Metallsieb aufgeschraubt und festgezogen. Nun wird ein Becherglas, das mit etwas Wasser befüllt ist, auf die Waage gestellt und tariert. Das Wasser im Becherglas dient zum Abfangen der Druckspitze durch den auftreffenden Wasserstrahl zu Beginn der Messung. Durch die Druckspitze wird von der Waage eine zu hohe Masse gemessen und die Vordruckphase wird möglicherweise zu früh beendet.

Jetzt kann die Messung gestartet werden. Nach der Vordruckphase, die beim Erreichen von 20% automatisch beendet wird, wechselt das Programm in die Hauptmessung. Die ausgepresste Wassermenge wird sekundlich aufgezeichnet. Wenn die Messung beendet ist, wird der Druck abgelassen und die Druckkammer kann geöffnet werden. Durch Drücken der Schaltfläche „Auswerfen“ fährt der Stempel mit dem Pellet hoch. Nach dem Wiegen der feuchten Probe, wird sie über Nacht im Trockenschrank getrocknet und zurückgewogen. Wenn die trockene Masse eingetragen ist, errechnet das Programm, ausgehend vom letzten Wert der Masse des Wassers, die gesamte Trockengehaltskurve.

3.2.2 Messroutine

Um eine Flächengewichtsabhängigkeit festzustellen, wurde die Grammaturn von 750 bis 3000 g/m² variiert. Bei 3000 und 2000 g/m² wurde eine Pressdauer von 400 Sekunden gewählt, bei den 4 weiteren flächenbezogenen Massen (1500 g/m², 1250 g/m², 1000 g/m², 750 g/m²) war die Pressdauer 200 Sekunden.

Zusätzlich wurde bei unterschiedlichen Drücken gemessen: 3 MPa, 6 MPa und 9 MPa. Es wurde eine Doppelbestimmung gemacht und im Bedarf eine Wiederholung. Für die meisten Auswertungen wurden die Mittelwerte aus 2 oder 3 Messungen herangezogen. Somit erhält man bei der Messung eines Stoffes 18 Messreihen für die Auswertung.

Die Form des Druckprofils war bei allen Versuchen rechteckförmig. Es wurde versucht, bei allen Messungen mit derselben Anfangsstoffdichte zu befüllen. Bei den hohen Grammaturnen musste manchmal mit einer etwas höheren Stoffdichte befüllt werden, da die Kammer nur maximal 200 ml fasst.

Bei der Betrachtung der Messdaten ist zu bedenken, dass der Druckregler bis zu 5 Sekunden benötigt, um auf den gewünschten Druck zu regeln.

Die Datenaufzeichnung beginnt mit Sekunde 0, dies ist jener Punkt bei dem 20% Trockengehalt erreicht sind. Ab Sekunde 1 versucht der Druckregler den eingestellten Druck zu erreichen. Da es vorkommt, dass Fehler in der Datenübertragung auftreten, werden für die Auswertung der Modelle die Trockengehalte ab Sekunde 1 verwendet.

3.3 Vorstellung der gemessenen Stoffe

Die Tabelle 3-2 enthält einige wichtige Labordaten der gemessenen Stoffe, auf die in diesem Kapitel näher eingegangen wird.

Eine Probe wurde nach einem Entstipper entnommen, die andere nach der Mahlung. In der Arbeit werden diese Stoffe mit den Bezeichnungen OCC n. E. und OCC n. M. abgekürzt.

3.3.4 Deinked Pulp

Um noch einen Stoff aus dem Sektor der grafischen Papiere zu messen, und aus Gründen der Verfügbarkeit, entschied man sich für einen Stoff aus der LWC Herstellung.

Der Faserstoff für LWC-Papier besteht hauptsächlich aus Altpapier der Klasse III (Zeitungen und Illustrierte). Dies und ein Füllstoffanteil von ~17 % sollte zu einem hohen Trockengehalt führen. Aus rechtlichen Gründen wird hier die Faserstoffquelle nicht erwähnt.

3.3.5 Unbleached Kraft Pulp 2 und Bleached Kraft Pulp

Gegen Ende der Arbeit bot sich noch einmal die Möglichkeit einen ungebleichten Langfaser Kraftzellstoff zu messen. Da die Messungen mit Langfaserzellstoffen durch ihre Neigung zur Flockenbildung sehr schwierig sind, und nicht alle Messergebnisse zufriedenstellend waren, wurde diese Möglichkeit genutzt.

An der Versuchspapiermaschine in Ravensburg sind auch Versuche mit der gebleichten Form dieses Langfaserstoffs durchgeführt worden. Aus diesem Grund wurde auch der BKP in die Versuchsreihe mit der pneumatischen Presse aufgenommen.

3.3.6 Gebleichter Langfaser Sulfatzellstoff

Dieser Stoff unterscheidet sich von den anderen Stoffen vor allem dadurch, dass er in Form von Bogenware geliefert wurde. Die restlichen gemessenen Stoffe waren feucht, in Form von gepressten Kuchen mit einer Stoffdichte von rund 30% ins Labor gekommen.

Getrocknete Fasern entwässern schneller, da sie durch die Trocknung verhornt sind und das Quellvermögen der Fasern dadurch abnimmt.

Der LF Sulfatzellstoff ist von der Zellstoff Pöls AG und besteht, laut Angaben auf der Homepage [29], aus rund 70% Fichte, 25% Kiefer und 5% Lärche.

3.4 Vorversuche zur Bestimmung der Randbedingungen und Einflussgrößen

In diesem Kapitel werden einige der möglichen limitierenden Faktoren der Messung genauer betrachtet. Es werden die Messkurven niedrigster Grammaturen, limitierende Faktoren der Kanüle, die Retention der FiberXPress und eine mögliche Rückbefeuchtung von Sieb und Kanüle geprüft.

3.4.1 Untere Grenze der Grammatur

Die ersten Versuche wurden mit einem unbekanntem Zellstoff durchgeführt. Sie dienten hauptsächlich zur Gewöhnung an das Gerät, der Bestimmung der limitierenden Faktoren, und um festzustellen, ob eine Abhängigkeit vom Flächengewicht sichtbar ist.

Im Diagramm 3-1 ist zum Einen die Trockengehaltssteigerung der verschiedenen Grammaturen und zum Anderen der Verlauf der Dicke über die Presszeit dargestellt. Die Dicke wird mit einem Potentiometer gemessen. Bei den Vorversuchen war dieses nicht

kalibriert und somit ist der absolute Wert der Dicke falsch. Zum Veranschaulichen des unterschiedlichen Verlaufs ist es aber ausreichend.

Die Trockengehaltskurven der einzelnen Flächengewichte verlaufen, mit Ausnahme der 749 g/m² Kurve, wie erwartet. Das höchste Flächengewicht entwässert am langsamsten und umgekehrt. Eine Möglichkeit zur Erklärung des Verhaltens der 749 g/m² Kurve könnte das Anstehen des Kolbens sein. Der Kolben hat aus baulichen Gründen seinen Anschlagpunkt erreicht und kann keinen Druck mehr auf die Probe aufbringen. Eine weitere Trockengehaltssteigerung ist nicht mehr möglich. Ein weiteres Problem, das speziell bei niedrigen Flächengewichten auftritt, ist das starke Schwanken des Trockengehaltes am Ende des Versuchs. Da nur mehr eine geringe Wassermenge ausgepresst wird, fällt ein leichtes Schwanken der Waage oder ein Tropfen der sich in der Kanüle angesammelt hat, stärker ins Gewicht.

Betrachtet man den Verlauf der Dicken, so verhalten sich diese genau umgekehrt, was auch zu erwarten war. Bei 749 g/m² sieht es so aus, als hätte das Potentiometer sofort seine Endposition erreicht.

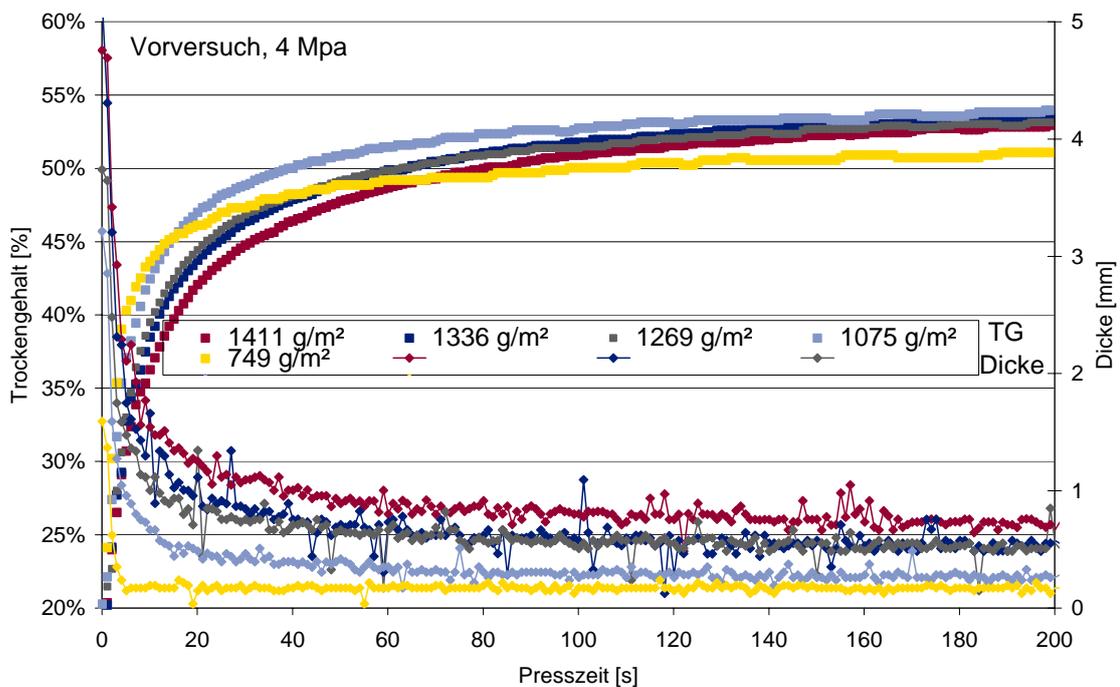


Diagramm 3-1: Vorversuch, Trockengehalts- und Dickenverlauf über der Presszeit

Im Diagramm 3-2 sind die Dickenverläufe eines Versuchs dargestellt bei dem das Potentiometer kalibriert wurde. Durch das Herausfahren des Kolbens und Auslesen der Dicke wurde die Endposition von 0,6 mm ermittelt. Bei der Messung der 806 g/m² Probe erreichte der Kolben diesen Endwert. Somit kann die Probe nicht weiter ausgepresst werden. Der Verlauf der Kurve ist verglichen mit der 749 g/m² Messung des vorherigen Diagramms auch etwas runder. Dies bestätigt die Annahme, dass das Potentiometer seine Endposition erreicht hat.

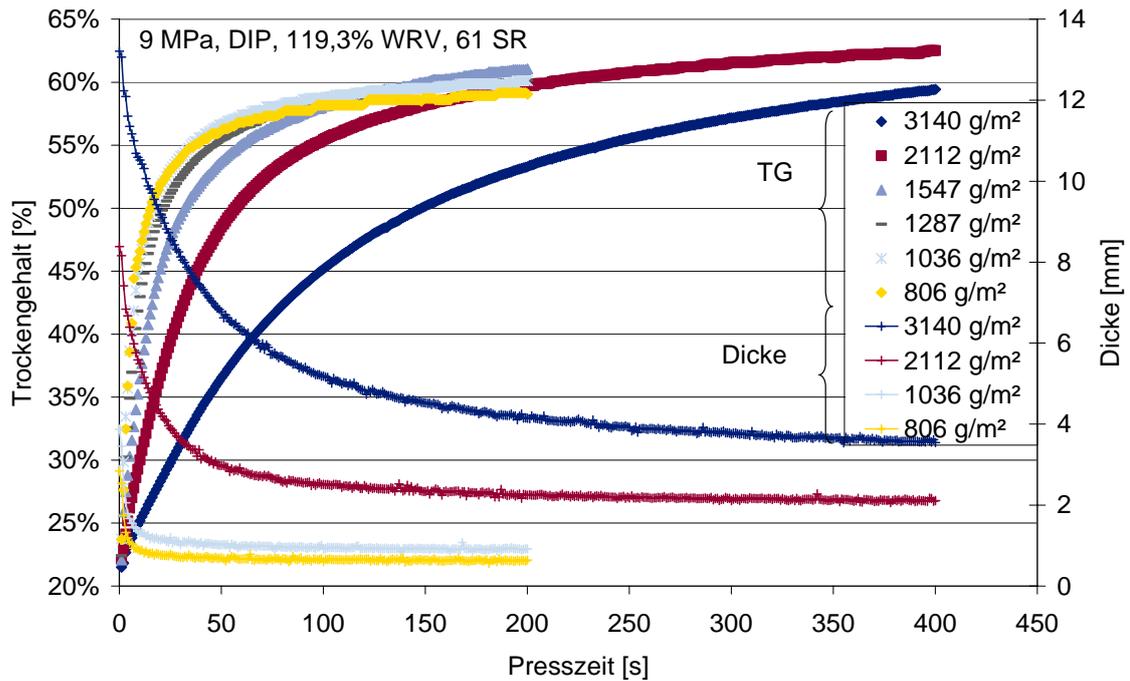


Diagramm 3-2: Dicken- und TG-Verlauf

Um eine Flächengewichtsabhängigkeit besser darzustellen, wird eine andere Darstellung gewählt. Im Diagramm 3-3 wird für jede Flächenmasse die benötigte Zeit aufgetragen, um eine 5%-ige Trockengehaltssteigerung zu erreichen. Mit zunehmendem Trockengehalt verlängert sich die Pressdauer. Schon in diesem kleinen Flächengewichtsbereich, ist eine Abhängigkeit zwischen Grammaturn und Trockengehalt erkennbar.

Betrachtet man die 750 g/m² Punkte bei den Trockengehalten 40%-45% und 45%-50%, ist auch in dieser Darstellung zu erkennen, dass die Messung von 750 g/m² nicht mit den anderen Messungen übereinstimmt.

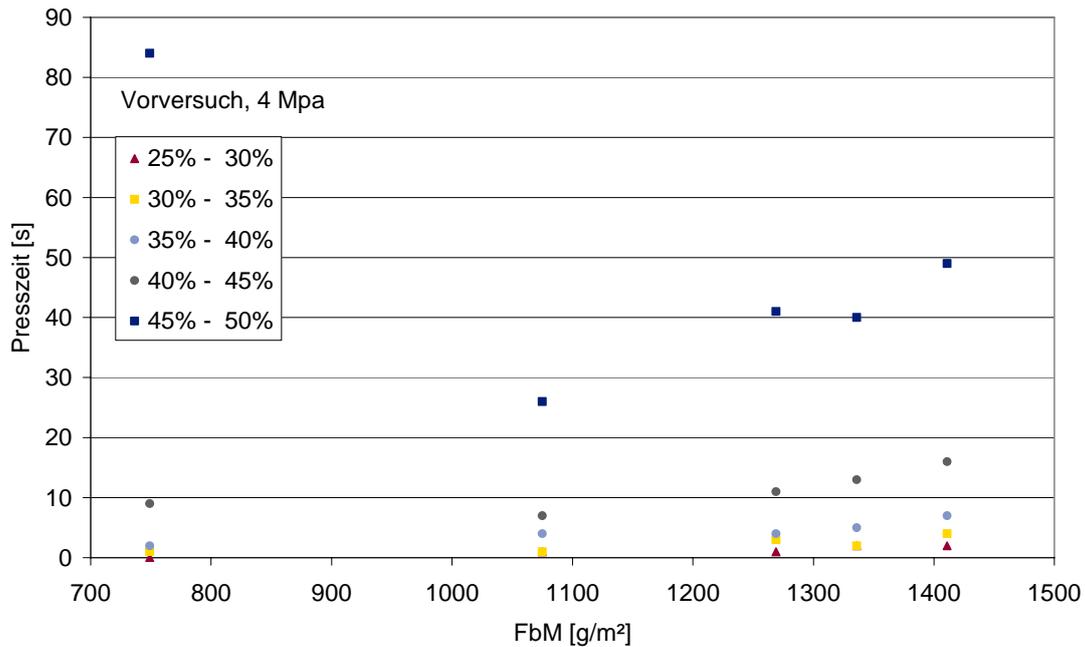


Diagramm 3-3: Vorversuch, Ansteigen der Presszeit mit Grammatür und Trockengehalt

3.4.2 Maximaler Volumenstrom durch die Kanüle

Es stellte sich noch die Frage, ob die Kanüle ein limitierender Faktor bei der Entwässerung ist. Mit Hilfe des Gesetzes von Hagen-Poiseuille, das die Strömung in einem dünnen Rohr beschreibt, kann die maximal mögliche Durchflussrate berechnet werden.

$$(10) \quad Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l}$$

Q ... Volumenstrom [m^3/s]

r ... Innenradius [m]

Δp ... Druckdifferenz [Pa]

η ... dyn. Viskosität [$Pa \cdot s$]

l ... durchströmte Länge [m]

Werden folgende Werte eingesetzt $r = 4,1 \cdot 10^{-4} m$, $\Delta p = 4000000 Pa$, $\eta = 0,000885 Pa \cdot s$, $l = 0,04 m$ und der Volumenstrom mit $\rho = 903 kg/m^3$ in einen Massenstrom umgerechnet, erhält man unter diesen Bedingungen den möglichen Massenstrom durch die Kanüle. Dieser beträgt bei 4 MPa 1132 g/s. Da dieser Wert sehr groß ist, wird die Reynoldszahl überprüft.

Dafür wird die Geschwindigkeit aus dem Massenstrom berechnet und dann in die Reynoldsformel eingesetzt.

$$(11) \quad Re = \frac{l_{ch} \cdot \rho \cdot w}{\eta}$$

l_{ch} ... charakteristische Länge [m]

w ... Geschwindigkeit [m/s]

ρ ... Dichte [kg/m^3]

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1132 \cdot 4 \cdot 903}{903 \cdot (2 \cdot 4,1 \cdot 10^{-4})^2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 0,000885} = 2,2 \cdot 10^6$$

Nachdem das Gesetz von Hagen-Poiseuille nur bei laminaren Bedingungen gültig ist, kann es hier nicht verwendet werden.

Für turbulente Rohrströmungen gilt folgende Formel:

$$(12) \quad w_m = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot d \cdot 2}{\lambda \cdot l \cdot \rho}}$$

$w_m \dots$ mittlere Geschwindigkeit [m/s]
 $\lambda \dots$ Rohrreibungszahl [1]

Für λ wird, mit Hilfe der Reynoldszahl und einer geschätzten Rauigkeit, der Wert 0,02 eingesetzt. Somit erhält man eine mittlere Geschwindigkeit von 95,3 m/s und einen Massenstrom von 45,5 g/s.

Der Massenstrom, der durch die Entwässerung auftritt, bewegt sich bei diesem Stoff zwischen 1,3 und 0,004 g/s. Auch wenn ein 3000 g/m² Pellet entwässert werden würde, wäre der Massenstrom nicht höher als 45,5 g/s.

Da die Rohrreibungszahl auf Schätzungen basiert, wurde versucht die Werte 0,0022 und 0,2 einzusetzen. Auch in diesen beiden Fällen kann genügend Wasser durch die Kanüle fließen.

3.4.3 Retention

In einer früheren Arbeit mit der FiberXPress wurde schon festgestellt, dass der Füllstoffanteil eine große Auswirkung auf den Verlauf der Trockengehaltskurven hat.

Ein Punkt der Bachelorarbeit von HOFMANN [30] war die Berechnung der Füllstoffrückhaltung im FXP. Diese betrug im Durchschnitt 85%. Bei der Zugabe von Retentionsmitteln erhöhte sich der Wert auf nahezu 100%. Für die Berechnung der Füllstoffrückhaltung wurde der Aschewert des FXP-Pellets nach dem Pressvorgang mit dem Aschewert der Suspension verglichen. Ein Problem dabei könnte sein, dass bei der Bestimmung des Glührückstands von der Suspension die sogenannte Schnellveraschung durchgeführt wurde. Dabei wird der Stoff vorher über ein Filter abgenutscht. Dadurch könnten schon Füllstoffe verloren gehen. Vergleicht man aber die Werte der Schnellveraschung bei 30% Füllstoff mit und ohne Retentionsmittel, so ist kein Füllstoffverlust durch das Filtrieren festzustellen.

In einer anderen Arbeit [31] wurde untersucht wie sich die Höhe des Vordrucks auf den Endtrockengehalt auswirkt. Das Ergebnis, je höher der Vordruck desto geringer der Trockengehalt, deutet darauf hin dass bei einem höheren Vordruck mehr Füll- und

eventuell auch Feinstoffe ausgeschwemmt werden. In einem anderen Versuch dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die Faserverluste durchschnittlich 0,008 g betragen und eine Retention von 99,87% erreicht wird. In diesem Test wurde das ausgepresste Wasser über einen Kaffeefilter filtriert und somit der Faserrückstand bestimmt.

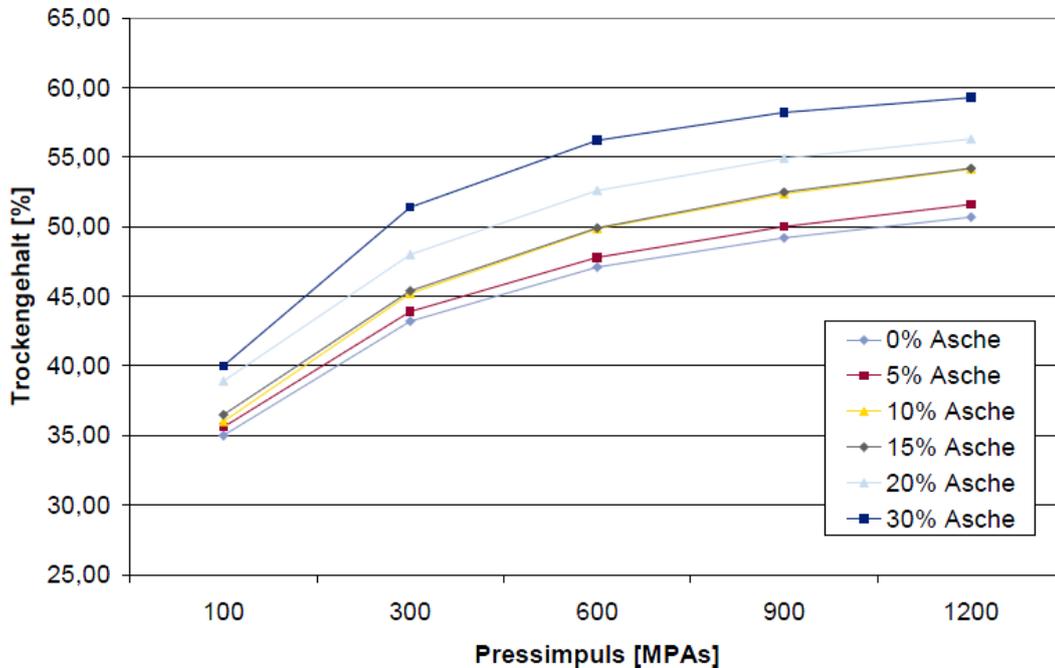


Abbildung 3-4: Abhängigkeit des Aschegehalts vom Trockengehalt bei 6 MPa [30]

Die Labordaten der gemessenen Stoffe dieser Arbeit sind in Tabelle 3-2 auf Seite 21 zu finden.

Bei den Stoffen LF/DIP, LF und bei dem Kraftlinerstoffen (UBKP, UBKP2, BKP) ist der Aschegehalt sehr gering und es wird sich bezüglich der Füllstoffretention keine Aussage machen lassen. Bei Zellstoffen ist der Aschegehalt auch mehr ein Maß für anorganisches Material und Mineralsalze im Rohstoff als Indikator für Füllstoffe.

Einzig der OCC und der DIP-Stoff haben einen höheren Glührückstand und somit einen nennenswerten Füllstoffgehalt.

Wird davon ausgegangen, dass nicht nur Füllstoffe, sondern auch Feinstoffe zur Retention beitragen, sollte auch die Feinstofffraktion betrachtet werden. Beim Stoffgemisch LF/DIP fällt der steigende längengewichtete Feinstoffanteil in Abhängigkeit des Mahlgrades auf. Die Stoffe UBKP und OCC zeigen dieses Verhalten nicht.

Um genauere Aussagen über das Retentionsverhalten der FiberXPress zu tätigen, müssten Vordruckphase und Hauptdruckphase genauer betrachtet werden. Es sollte nach der Messung nicht nur der Glührückstand des Pellets bestimmt werden, sondern auch der Feinstoffanteil im ausgepressten Wasser.

3.4.3.1 Versuche zur Retention

Die Versuche werden mit dem DIP-Stoff und dem OCC nach Mahlung durchgeführt. Um sicherzustellen, dass keine Rückstände in Filtern oder ähnlichem zurückbleiben, wird das gesamte ausgepresste Wasser in einem Becherglas aufgefangen und anschließend eingedampft. Um zusätzliche Fehlerquellen auszuschließen, wird kein Wasser in das Becherglas vorgelegt. Damit die einzudampfende Wassermenge nicht zu groß wird, wird eine flächenbezogene Masse von 1250 g/m² gewählt. Die Versuche werden bei 6 und 9 MPa, mit einer Presszeit von 200 Sekunden durchgeführt. Bei der Bestimmung der Retention in der Vordruckphase (nur VD), wird nach dieser das Versuchsprotokoll der FiberXPress unterbrochen. Die in Tabelle 3-3 dargestellten Ergebnisse der Doppelbestimmungen bestätigen die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Arbeiten. Wird die Retention nur in der Vordruckphase betrachtet, so ist hier die Zurückhaltung der Füllstoffe geringer als im gesamten Pressvorgang. Der Grund dafür ist die geringere Konsistenz am Anfang der Messung. Am Ende der Vordruckphase ist der Stoff schon kompaktiert und Füllstoffe können nicht mehr so leicht durch die dichte Fasermatte.

Tabelle 3-3: Versuchsergebnisse zur FXP-Retention

DIP, 1250 g/m²						
Druck	nur VD	nur VD	6 MPa	6 MPa	9 MPa	9 MPa
FXP Füllstoffretention [%]	86,03	87,89	94,64	95,34	87,19	
FXP Gesamtretention [%]	97,56	97,88	99,06	99,19	97,76	
OCC nach Mahlung, 1250 g/m²						
Druck	nur VD	nur VD	6 MPa	6 MPa	9 MPa	9 MPa
FXP Füllstoffretention [%]	90,48	90,48	87,80	93,75	86,32	88,99
FXP Gesamtretention [%]	98,70	98,70	98,33	99,14	98,13	98,49

3.4.4 Rückbefeuchtung durch Sieb und Kanüle

Ein weiterer Punkt, der zu einer Verfälschung des Trockengehalts führen kann, ist die Rückbefeuchtung am Ende der Messung durch Metallsieb und Kanüle.

Die Masse des feuchten Pellets am Ende der Messung ist ausschlaggebend für den gesamten Trockenverlauf, da die Trockengehaltskurve ausgehend vom letzten Trockengehalt rückwärts berechnet wird.

Zur Abschätzung der möglichen Rückbefeuchtung werden zuerst die maximal möglichen Wassermengen von Kanüle und Metallsieb berechnet.

Für die Kanüle wird aus Radius und Länge der Kapillare das Volumen berechnet, und mit der Dichte in eine Masse umgerechnet. Die dafür benötigten Daten sind im Kapitel 3.4.2 Maximaler Volumenstrom durch die Kanüle, angegeben.

Für die Kanüle ergibt sich eine maximal mögliche Wassermenge von 0,019 g.

Die Wassermenge die sich in den Zwischenräumen des Metallsiebs befindet, kann mit Hilfe der Drahtgeometrie und der offenen Siebfläche berechnet werden. Das verwendete Metallsieb wird auch für die Blattbildung im Labor verwendet. Nach der EN ISO 5269-

1:2005 (D) muss die nominale Maschenweite 125 μm betragen und der Durchmesser der Siebdrhte muss 90 μm sein (mit einem Toleranzbereich zwischen 77 μm und 104 μm).

Der Anteil der offenen Siebfläche beträgt 33,80%. Für die Berechnung des Wasservolumens wird angenommen, dass die Höhe dem Drahtdurchmesser entspricht. Somit ergibt sich eine Wassermasse von 0,06 g.

Da aber auch Wasser an der Sieboberfläche anhaftet und rechnerisch schwer zu ermitteln ist, wird auf einen Versuch zurückgegriffen. Im Versuch werden 10 Siebe in ein mit Wasser gefülltes Becherglas, das auf einer Waage steht, getaucht und etwas abgeschüttelt. Dabei zeigte sich zwischen unbenutzten Sieben und schon verwendeten Sieben kein Unterschied in der Wasseraufnahme.

Die experimentell bestimmte Wasseraufnahme des Metallsiebs beträgt 0,1 g.

Da sich die einzelnen Rohstoffe aber in ihrem Porensystem unterscheiden, sollten sie das zur Verfügung stehende Wasser von Sieb und Kanüle unterschiedlich stark aufnehmen. Ob diese Eigenschaft auch auf die FiberXPress Versuche zutrifft, soll mit Hilfe von Sweet-Plots festgestellt werden. SWEET [32] erkannte, dass der Trockengehalt des Papiers nach der Presse, aufgetragen in Form eines moisture ratios [gWasser/gFaser], dargestellt über der reziproken Grammaturn eine gerade Linie ergibt. Dazu müssen alle anderen Versuchsbedingungen konstant gehalten werden. Es wurde außerdem gezeigt, dass die Rückbefeuchtung nur von den Filz- und Papiereigenschaften abhängt. Für diese Versuche muss der hydraulische Druck aus dem Fließwiderstand vernachlässigbar sein [3].

Um dies nachzustellen, werden Langzeitversuche mit der FXP durchgeführt, bei denen die Presszeit auf das Maximum von 1000 Sekunden eingestellt wird. Nach dem Pressen wird das feuchte Pellet gewogen und seine trockene Masse bestimmt. Durch die lange Presszeit soll der Grenzrockengehalt erreicht werden, der von der flächenbezogenen Masse unabhängig ist. Somit kann nur durch den Einfluss der Rückbefeuchtung eine Grammaturnabhängigkeit entstehen. Es stellte sich heraus, dass für diese Versuche der DIP Stoff am Besten geeignet ist, da fast alle Trockengehaltskurven der unterschiedlichen Grammaturn am Ende flach verlaufen.

Im Diagramm 3-4 sind die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Die Messdaten in hellblau wurden eine Woche später gemessen. Durch die Alterung erreicht der Stoff nicht denselben Trockengehalt. Es ist aber zu erkennen, dass die Steigung und somit die Rückbefeuchtung annähernd gleich bleibt. Berechnet man aus dem Mittelwert der Steigung die Rückbefeuchtung in g, so ergibt sich, dass 0,347 g Wasser zurück ins Pellet wandern. Zum Vergleich wurden auch Versuche mit dem „UBKP vor D5/6“ durchgeführt. Es zeigte sich, dass keine Rückbefeuchtung festzustellen ist.

Der Unterschied zwischen der Wassermenge aus den Vorversuchen (~0,12g) und der aus den Langzeitversuchen, kann an dem anhaftendem Wasser auf der Lochplatte liegen. Dieses Wasser wird dann zusätzlich ins Pellet gesaugt, und die Rückbefeuchtung wird höher.

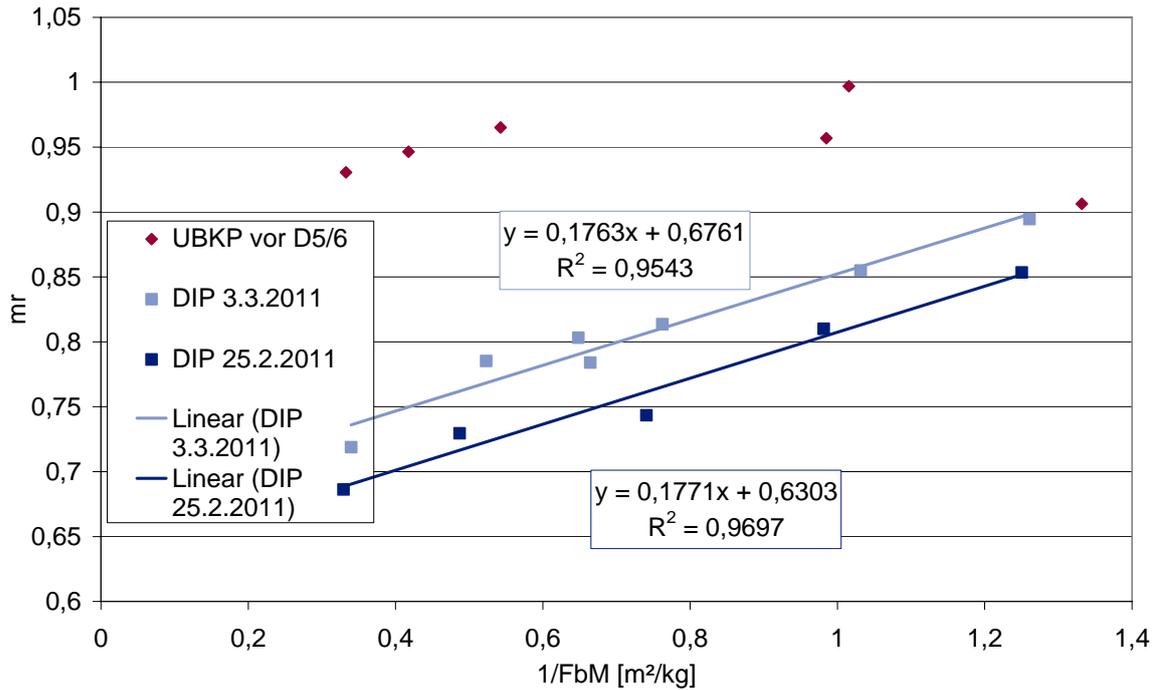


Diagramm 3-4: Experimentelle Bestimmung der Rückbefeuchtung

Im Diagramm 3-5 werden die erreichten Trockengehalt in Form des moisture ratio nach 100, 400 und 999 Sekunden aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich nach einer Presszeit von 100 Sekunden hohe Grammatoren noch im „flow-controlled“ Bereich aufhalten. Der hydraulische Druck spielt also noch eine Rolle. Wird die Presszeit vergrößert, erweitert sich der „pressure-controlled“ Bereich auf alle flächenbezogenen Massen. Nun ist nur mehr der Strukturdruck entscheidend und die Daten können für die Bestimmung der Rückbefeuchtung verwendet werden.

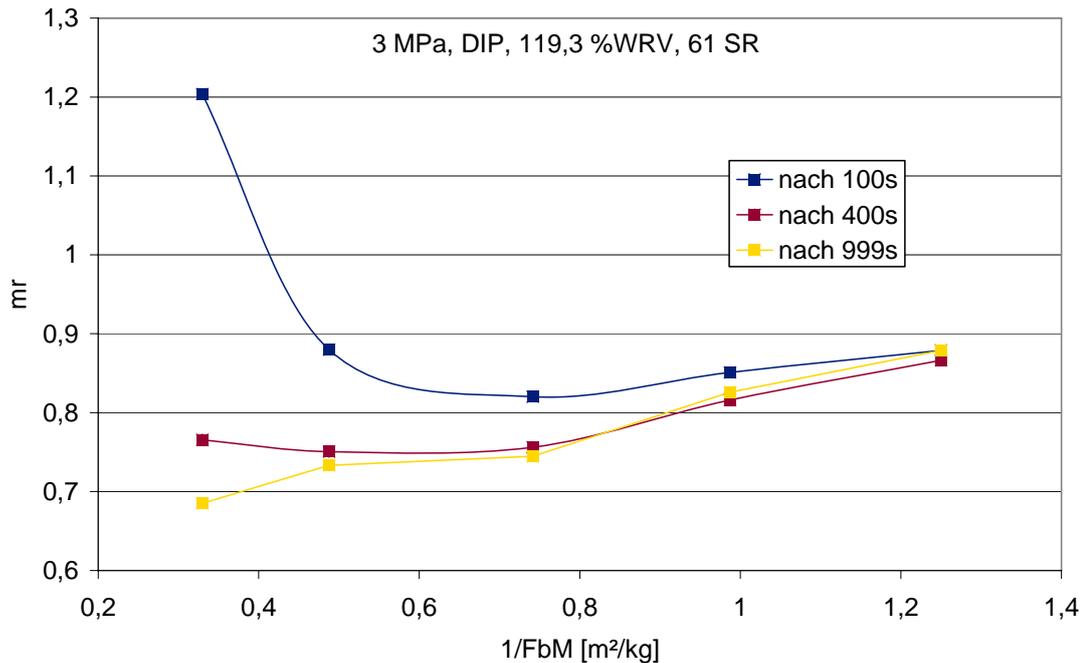


Diagramm 3-5: Analogie zu Sweet-Plots

Die Vorversuche lieferten folgende Ergebnisse:

- Der mögliche Massenstrom durch die Kanüle ist mehr als ausreichend für die Entwässerung.
- Bei niedrigen Flächengewichten können durch den anstehenden Kolben oder der langen Zeitspanne bis zum nächsten Tropfen falsche Messkurven entstehen.
- Die Füllstoffretention der FXP liegt bei rund 90%, die Gesamtretention bei ~98%. Da nicht alle Stoffe einen Füllstoffanteil besitzen, ist im weiteren Verlauf der Arbeit darauf zu achten, ob das Modell bei Stoffen mit Füllstoffen mehr Probleme hat, als bei Stoffen ohne Füllstoffanteil.
- Es lässt sich eine Rückbefeuchtung feststellen. Diese tritt aber nicht bei allen Stoffen auf. Durch die Rückbefeuchtung kommt es, dass niedrige flächenbezogene Massen einen geringeren Trockengehalt erreichen als hohe Grammaturen.
- Eine Abhängigkeit vom Flächengewicht ist eindeutig erkennbar. Ob ein signifikanter Unterschied zwischen verschiedenen Stoffen besteht und ob die Daten durch ein Modell beschrieben werden können bleibt noch offen.

4 Ermittlung charakteristischer Parameter für verschiedene Stoffe

In frühen Arbeiten mit FiberXPress, zum Beispiel in den Arbeiten [5,30,34], ist die qualitative Aussagekraft der Messdaten schon gezeigt worden, die quantitative Übertragbarkeit ist aber noch ein offener Punkt. Ein Hauptpunkt dieser Arbeit ist, mit Hilfe eines Modells aus der Literatur die FXP-Messdaten zu beschreiben und somit charakteristische Parameter für einen Rohstoff zu erhalten. Dies soll einen ersten Ansatz zur Übertragbarkeit auf reale Pressensituationen liefern und den Vergleich zwischen Rohstoffen kompakter und einfacher machen.

Als Erstes wird dafür eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um zu testen wie sensibel die Flächengewichtsabhängigkeit ist. Da FiberXPress in einem höheren Grammaturbereich operiert als in der Papierindustrie üblich ist, ist die Ermittlung und Beschreibung der Grammaturnabhängigkeit ein wichtiger Punkt, um in den Bereich realer Pressensituationen zu gelangen.

Die weiteren Schritte sind die Auswahl eines Modells, die Parametersuche und Validierung des ausgewählten Modells und die Erweiterung des bestehenden Modells aus der Literatur.

4.1 Sensitivitätsanalyse

Ausgegangen wird von einem Diagramm, das für jede Grammaturn die benötigte Presszeit, um eine Trockengehaltssteigerung von 5% zu erreichen, darstellt. Beispielsweise sind bei einer flächenbezogenen Masse von 2000 g/m² ~30 Sekunden nötig, um von 35 auf 40 % Trockengehalt zu kommen. Bei 1000 g/m² werden für diesen Sprung nur ~10 Sekunden benötigt.

Durch die Messpunkte werden mit Excel Trendlinien der Form $y = a \cdot x^b$ durchgelegt. Die potenzielle Form beschreibt am Besten die Grammaturnabhängigkeit. Die dazugehörige Gleichung und das Bestimmtheitsmaß R^2 werden ebenfalls in Diagramm 4-1 angezeigt.

$$R^2 \equiv 1 - \frac{SSE}{SST}$$

$$(13) \quad SSE = \sum_i (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

$$SST = (\sum Y_i^2) - \frac{(\sum Y_i)^2}{N}$$

R^2 ... Bestimmtheitsmaß

Y_i ... Wert auf y-Achse

SSE ... Sum of squares of residuals

\hat{Y}_i ... y-Wert aus Funktion berechnet

SST ... Total sum of squares

N ... Anzahl der Werte

Excel berechnet für die Trendlinie ein „linearisiertes R^2 “ durch vorheriges Logarithmieren der Größen und der potenziellen Gleichung.

Im Diagramm 4-1 ist zu erkennen, dass die Trendlinien ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß erreichen. Bei den Gleichungen fällt auf, dass mit steigendem Trockengehalt die Vorfaktoren (a) immer größer werden und die Exponenten (b) kleinere Werte annehmen. Der Vorfaktor gibt an welche Zeit für die Entwässerung von 1 g/m² benötigt wird. Durch die Sensitivitätsanalyse soll festgestellt werden, wie viel sich der Vorfaktor und der Exponent ändern können, ohne dass sich das Bestimmtheitsmaß wesentlich verschlechtert.

Tabelle 4-1: Übersicht der Vorfaktoren und Exponenten

	25 %-30 %	30 %-35 %	35 %-40 %	40 %-45 %
Vorfaktor	2,097E-06	4,540E-06	2,072E-05	1,139E-03
Exponent	2,0806	2,0035	1,8683	1,4297
R ² Excel	0,9944	0,9681	0,9950	0,9820
R ² korrekt	0,9981	0,9915	0,9983	0,9833
Vorf.. wenn Exp =2	3,919E-06	4,841E-06	7,477E-06	1,342E-05
R ² (exp=2) direkt	0,9984	0,9941	0,9977	0,9313

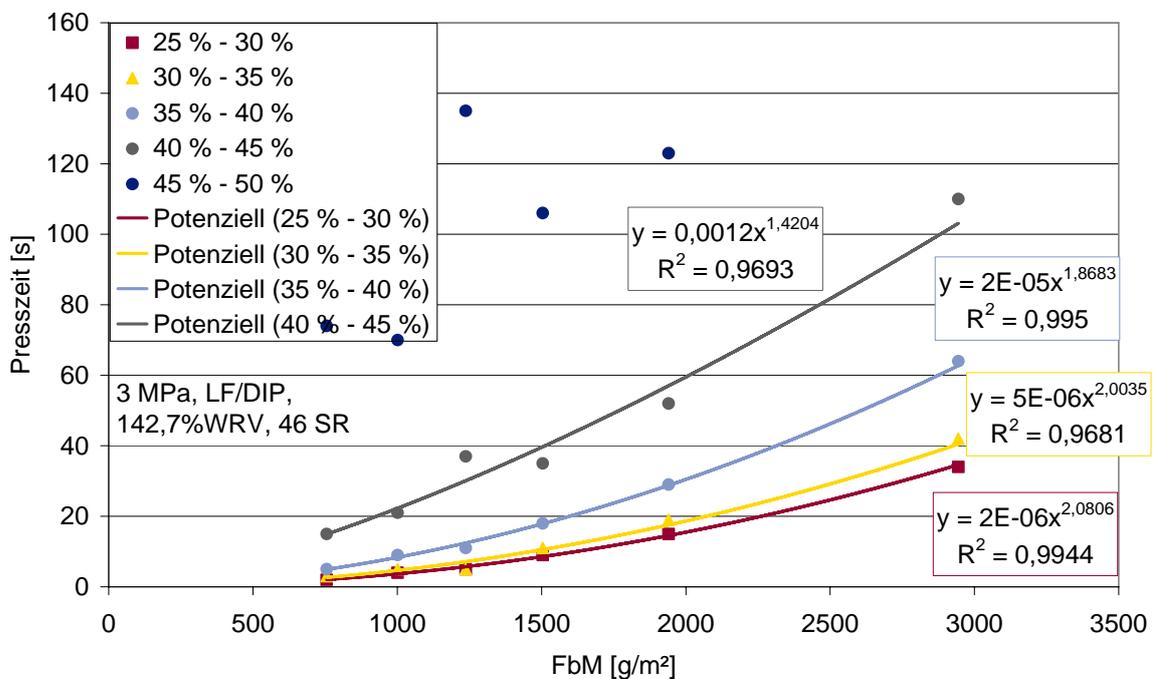


Diagramm 4-1: Abhängigkeit der Presszeit von der Grammat

Die Sensitivitätsanalyse wird mit der Excel Funktion: „Datentabelle“ durchgeführt. Dafür wird nicht R² des linearisierten Problems verwendet, sondern ein korrekt berechnetes, ohne vorher zu logarithmieren. Durch die korrekte Berechnung wird das R² etwas höher. Diagramm 4-2 stellt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse grafisch dar. Da die Unterschiede des Vorfaktors zwischen den Trockengehaltsstufen sehr groß sind, können nicht alle Diagramme im selben Bereich dargestellt werden. Auf der x-Achse befindet sich immer der Vorfaktor, auf der y-Achse der Exponent. Der Wertebereich von R² ist in sehr kleinen Abständen gewählt. Der schmale Bereich zeigt an, dass durch die Festlegung eines Faktors der andere relativ gut bestimmt ist. Es gibt aber viele Kombinationsmöglichkeiten

zwischen Vorfaktor und Exponent mit ähnlich hohem R^2 . Anhand der Sensitivitätsanalyse scheint es, als würden z.B. für einen Exponenten=2 alle Trockengehaltsstufen ein gutes Bestimmtheitsmaß erreichen. Um dies zu testen, werden mit dem Excel-Solver die passenden Vorfaktoren zum Exponent=2 gesucht. Das Ergebnis, das in Tabelle 4-1 dargestellt ist, fiel sehr gut aus. Alle TG-Stufen, bis auf das Trockengehaltsfenster 40-45% , erzielten ein $R^2 > 0,99$. Da der Vorfaktor die Entwässerungszeit von $1g/m^2$ wiedergibt, ergeben die steigenden Vorfaktoren Sinn, da es mit steigendem Trockengehalt immer schwerer wird das Wasser auszupressen.

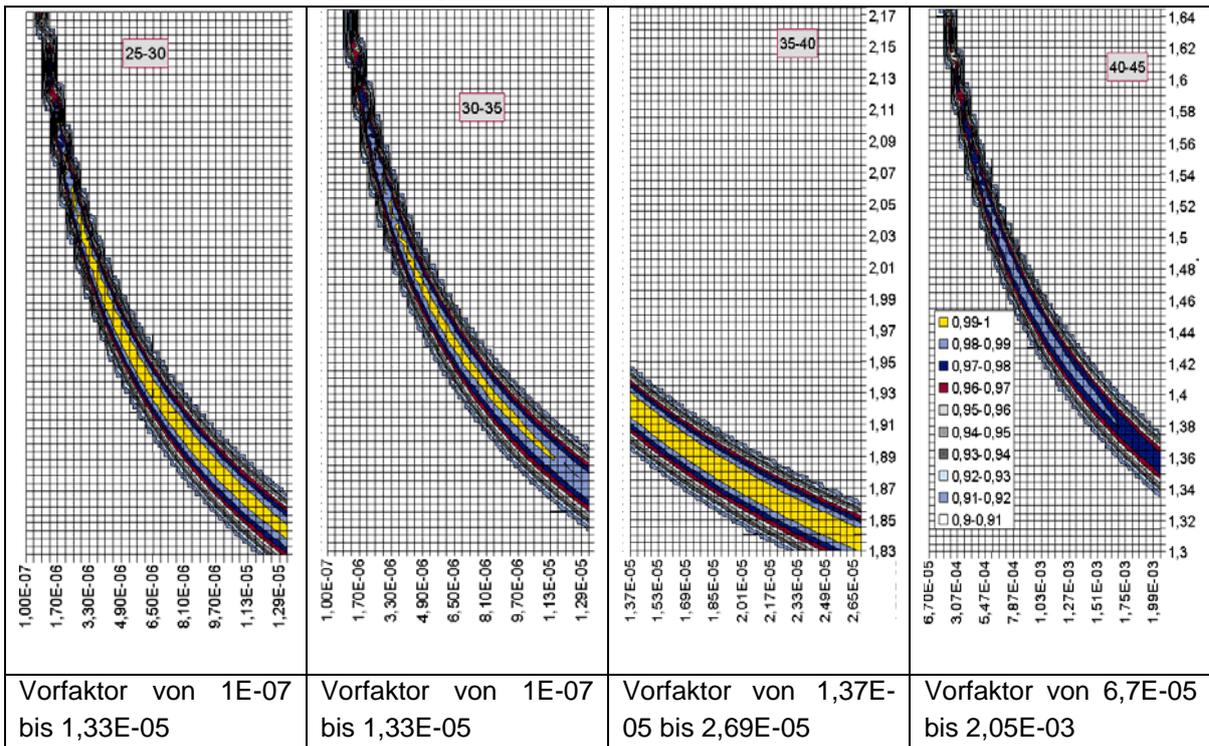


Diagramm 4-2: Sensitivitätsanalyse von unterschiedlichen TG-Bereichen

4.2 Auswahl eines geeigneten Modells zur Beschreibung der Versuche

In Kapitel 2.4 „Mathematische Modelle zur Beschreibung des Entwässerungsvorganges“, wurden die wichtigsten Modelle zur Beschreibung der Pressenentwässerung aufgeführt. Nun soll für die Versuche mit der FiberXPress ein geeignetes ausgewählt werden, um später charakteristische Parameter für jeden Stoff zu erhalten.

Beim viskoelastischen Modell (Kelvin-Body) geht die flächenbezogene Masse nicht direkt, sondern über die Parameter τ und C' ein. In den Versuchen von YOUNG, COULFIELD UND WEGNER [17,18] werden diese Parameter durch die Messung des Stoffes in einer “constant pressure compression permeability cell“ bestimmt. Da für jede Grammaturn andere Parameter benötigt werden, eignet sich dieses Modell nicht besonders, um eine Aussage über die Abhängigkeit der Grammaturn bezüglich der Entwässerung zu treffen. Speziell τ ist stark von der flächenbezogenen Masse abhängig.

Bei der von GUDEHUS [19] entwickelten Pressenformel (3), nähert sich der Trockengehalt im Nip mit steigender flächenbezogener Masse dem Grenztrockengehalt. Nachdem bei den Versuchen mit der FXP die hohen Grammaturen zu niedrigen Trockengehalten tendieren, ist die Pressenformel von Gudehus ungeeignet zur Beschreibung der Versuche.

Für das Modell das auf dem Konzept von HOLSTEGE [26] beruht „New life for an old concept“ sind aus Pressenversuchen, die mit dem MTS-Tester durchgeführt wurden, die Parameter bestimmt worden. Mit diesen Parametern wurde versucht, verschiedene Grammaturen darzustellen. Das Modell konnte aber mit einem Parametersatz die unterschiedlichen flächenbezogenen Massen nicht darstellen [25].

Aus diesem Grund wurde dieses Modell ebenfalls nicht zur Beschreibung der FiberXPress-Versuche verwendet.

Das Modell „Decreasing Permeability Sheet Layer“ beschäftigt sich ausschließlich mit dem Filzverhalten und dessen Auswirkungen auf den Trockengehalt. Nachdem bei der FiberXPress nur ein Metallsieb verwendet wird, und in dieser Arbeit auch keine Versuche mit verschiedenen Filzen durchgeführt werden, ist dieses Modell nicht geeignet um Aussagen zu treffen.

4.2.1 Decreasing-Permeability Model vs. Limiting-Consistency Model

Wie vorhin schon erwähnt, sind die Pressenversuche, die mit dem MTS-Tester durchgeführt wurden, schon mit einem Modell beschrieben worden. Auch für diese Arbeit wurden Modelle miteinander verglichen, und es stellte sich heraus, dass das DPM bzw. das LCM am besten dafür geeignet sind [25].

Darum werden die Auswertung der Messdaten mit dem DPM und LC-Model durchgeführt. Die Ermittlung der Parameter erfolgte aus der Formel (7). Als Starttrockengehalt wurde der erreichte Trockengehalt bei Sekunde 1 gewählt. Dieser beträgt ~20%. Der Pressimpuls wird stetig erhöht. Durch eine Minimierung der Summe der Fehlerquadrate zwischen Messdaten und Modell ermittelte der Excel-Solver die Parameter.

Nachdem die ersten Versuche, Parameter für diese Modelle zu finden, gut verliefen, wurde versucht eine Trockengehaltskurve für ein niedrigeres Flächengewicht zu berechnen.

Im Diagramm 4-3 sind die Messkurven, sowie die dazugehörigen berechneten Modellkurven des 783 g/m² Versuchs dargestellt. Wird mit den gefundenen Parametern versucht, die Trockengehaltskurve für kleinere flächenbezogenen Massen zu berechnen, fällt auf, dass das DPM sehr hohe, unrealistische Trockengehalte erreicht. Der Grenztrockengehalt des LCM zeigt hier einen klaren Vorteil gegenüber dem DPM. Beim Vergleich der 783 g/m² Messkurve mit den zwei Modellkurven ist auch zu erkennen, dass das Decreasing-Permeability Model stärker von den gemessenen Daten abweicht.

Aus diesem Grund, werden die folgenden Versuche geeignete Parameter zu finden, nur mehr mit dem Limiting-Consistency Model durchgeführt.

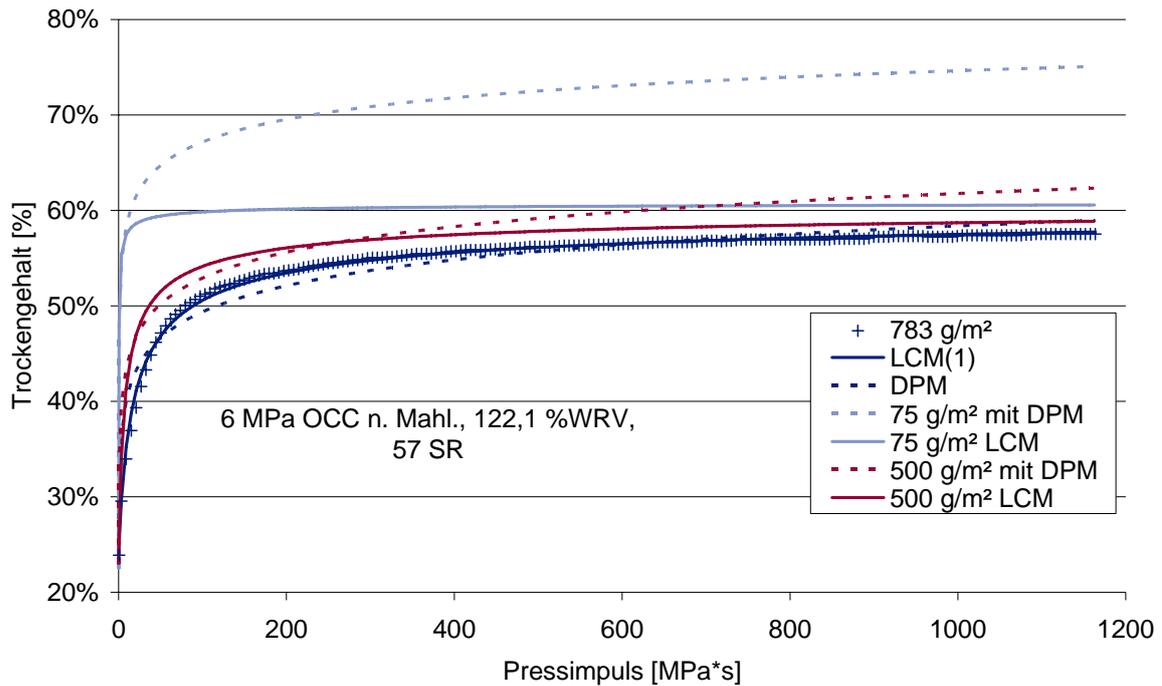


Diagramm 4-3: Vergleich des DPM mit dem LCM für niedrige Grammaturen

4.3 Parametersuche mit dem Limiting-Consistency Model

Im Folgenden sind die unterschiedlichen Versuche dargestellt, um die gemessenen Trockengehaltsverläufe mit dem LCM,

Formel (6)
$$c_N = c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \cdot I}{\eta \cdot W^2} + \frac{1}{(c_L - c_S)^2}}}$$
, darzustellen.

Dies wird beispielhaft mit den Versuchen: „LF/DIP 2“ durchgeführt. Wenn nicht anders erwähnt, wird mit einem Starttrockengehalt von ~20% gerechnet, der Druckimpuls wird stetig erhöht. Für die Viskosität wird die des Wassers bei 25°C und Umgebungsdruck, $\eta = 0,000885$ Pa s eingesetzt. Die Berechnung erfolgte mit einem Polynomansatz der Form: $\eta = (0,00000003128 \cdot T^4 - 0,000008856 \cdot T^3 + 0,0009713 \cdot T^2 - 0,05478 \cdot T + 1,774) \cdot 0,001$, wobei die Temperatur in °C einzusetzen ist.

In weiterer Folge werden Abkürzungen für das verwendete Modell verwendet. In Tabelle 4-2 sind die verwendeten Abkürzungen, die in den Diagrammen verwendet werden, erklärt. Zusätzlich verschafft sie eine Übersicht der bis jetzt angewendeten Arten der Parameteridentifikationen und der Modellerweiterungen.

Tabelle 4-2: Übersicht der verschiedenen Arten der Parameteridentifikation und Modellerweiterungen

Abkürzung	Erklärung	Parameter
LCM(1)	Parametersatz für jede FbM für jeden Druck→18 Parameter	$c_L(\text{FbM},p),k(\text{FbM},p)$
LCM(2)	Parametersatz innerhalb eines Druckes für alle FbM→3 Parameter	$c_L(p),k(p),m(p)$
LCM(3)	Globaler Parametersatz (alle Drücke,alle FbM) →1 Parametersatz	c_L, k, m
LCM(4)	Globaler Parametersatz mit Druckkorrektur	c_L, k, m, d
LCM(5)	Globaler Parametersatz mit Druck- und Impulskorrektur	c_L, k, m, d, i
LCM(6)	Globaler Parametersatz des unveränderten Modells	c_L, k
LCM(7)	Globaler Parametersatz mit Rewetting-Term	c_L, k, m, d, R

4.3.1 Parametersuche für jede Grammatr innerhalb eines Druckes

Zu Beginn wird ein eigener Parametersatz für jedes Flächengewicht innerhalb eines Druckniveaus gesucht. Als Eingangstrockengehalt c_S wird der erreichte Wert nach 1 Sekunde gewählt. Dieser bleibt für die ganze Berechnung gleich, der Druckimpuls wird stetig erhöht. Es werden nur die Parameter k und c_L gesucht. Das Quadrat des Flächengewichts bleibt vorerst. Insgesamt werden 18 Parametersätze mit je 2 Variablen gesucht.

$$TG(t+1) = LCM [FbM, PI(t), \Delta t=1, TG(t=1), k, c_L]$$

Unter diesen sehr einfachen Voraussetzungen findet der Excel-Solver eine sehr gute Lösung. Im Diagramm 4-4 sind die Ergebnisse des 6 MPa Versuchs dargestellt. Die gefundenen Parametersätze beschreiben die Messkurven nahezu perfekt. Die gemessenen Entwässerungsverläufe sind mit Kreuzen gekennzeichnet, die berechneten Kurven mit einer durchgezogenen Linie. Der in Klammer gesetzte Wert ist ein Index für die verwendete Methode der Parameteridentifikation. Die Ergebnisse sind bei 3 und 9 MPa gleichwertig (siehe Anhang Seite 81).

Die ermittelten Parameter verlaufen nicht beliebig, sondern haben einen eindeutigen Trend und sind voneinander abhängig; sie sind im Diagramm 4-5 dargestellt. Zusätzlich werden noch Trendlinien durch die Parameterpunkte gelegt und extrapoliert, um niedrigere Grammaturen berechnen zu können, und um zu veranschaulichen wie sich der Parameter k , aus Formel (7), mit abnehmender flächenbezogener Masse ändert. Das Ansteigen des Grenzrockengehalts mit steigender flächenbezogener Masse ist etwas ungewöhnlich, kann aber durch die Rückbefeuchtung erklärt werden.

Wird versucht, die Parameter für eine niedrigere Flächenmasse zu extrapolieren, in diesem Beispiel für 60 g/m^2 , so erhält man $k=9,768 \cdot 10^{-9} [\text{kg}^2/\text{m}^4]$ und $c_L=55\%$. Der Trockengehaltsverlauf der für eine flächenbezogene Masse von 60 g/m^2 berechnet wird, steigt erwartungsgemäß sehr schnell an, die Entwässerungskurve ist in Diagramm 4-4

dargestellt. Es ist auch zu erkennen, dass die 760 g/m² Kurve am Ende etwas höher liegt als die extrapolierte 60 g/m² Kurve. Dies lässt sich in diesem Fall durch den kleiner werdenden Grenzrockengehalt erklären. Das Beispiel zeigt, dass die Extrapolation ein Problem darstellen kann.

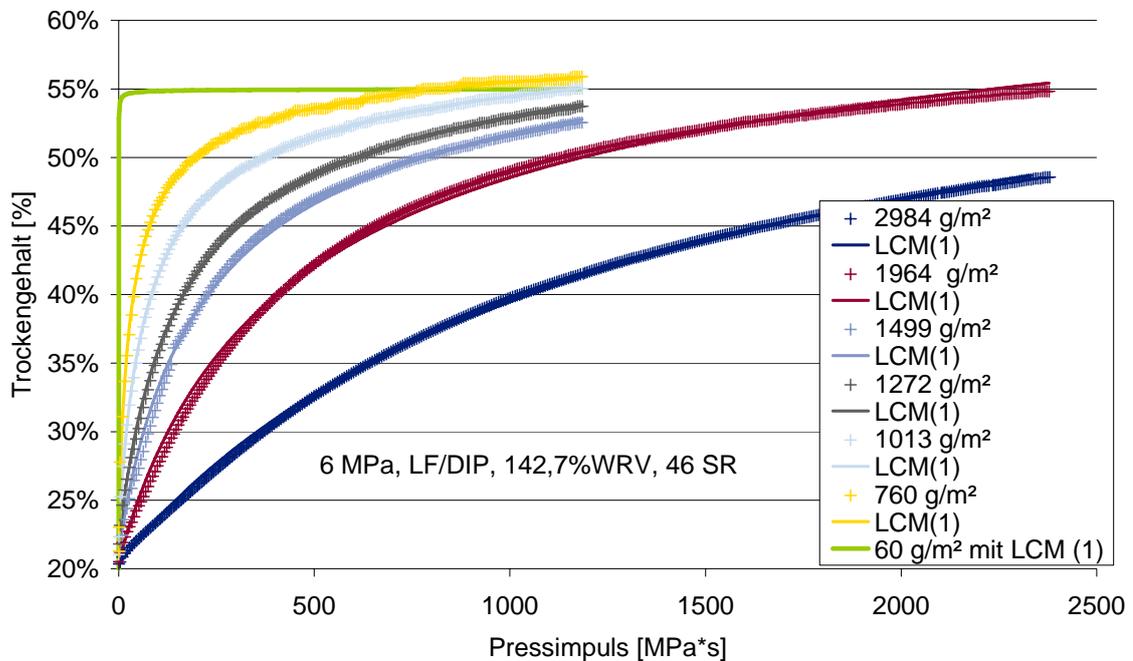


Diagramm 4-4: Vergleich der Messwerte mit den Modellkurven des originalen LC-Modells

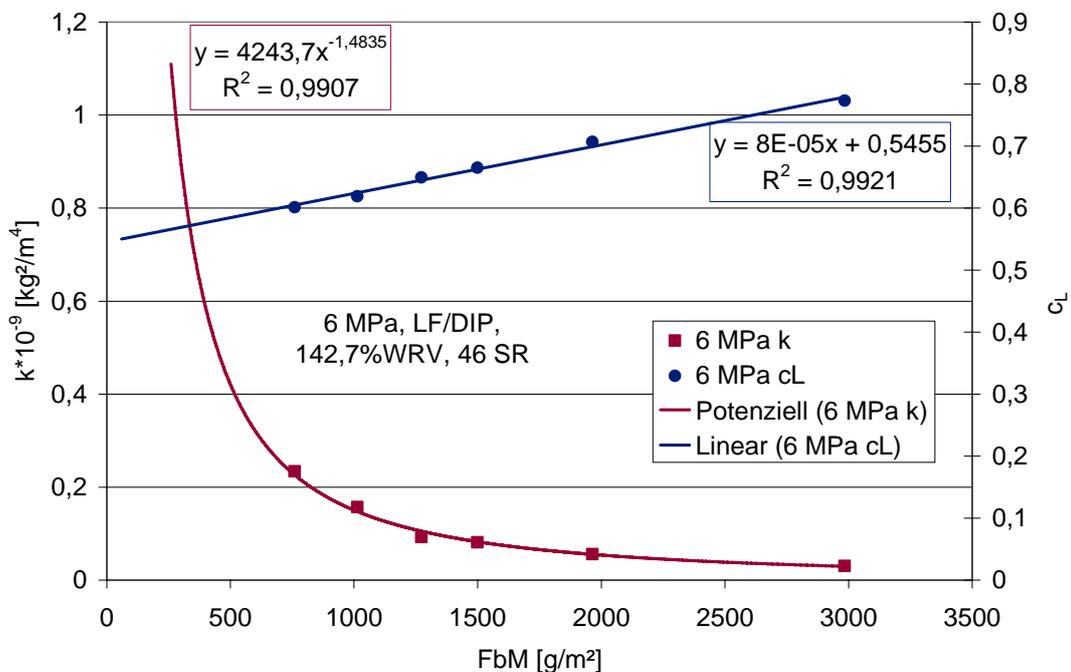


Diagramm 4-5: Parametervergleich des originalen LC-Modells

Im Diagramm 4-6 ist die Skalierung der x-Achse so gewählt worden, dass man in etwa in den Bereich realer Pressimpulse kommt. Um die Auswirkung des Pressimpulses besser darzustellen werden für die 60 g/m² Entwässerungskurve Zwischenschritte berechnet. Es wird von einem Starttrockengehalt von 20% ausgegangen.

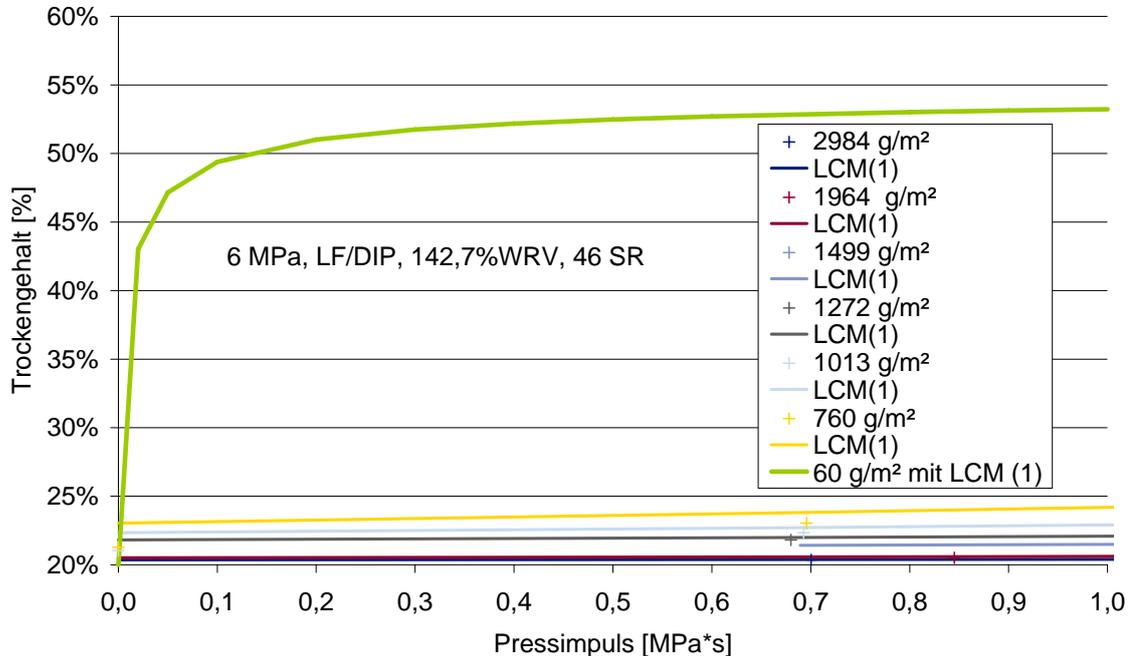


Diagramm 4-6: Entwässerungsverlauf im Bereich realer Pressimpulse

4.3.1.1 Interpretation der Modellparameter

Der Parameter k hängt von der Kuchendichte zum Quadrat, der Carman-Kozeny-Konstante und der spezifischen Oberfläche zum Quadrat ab. Der Grenztrockengehalt gibt den maximal möglichen Trockengehalt dieses Stoffes an.

Nachdem k für 60 g/m² so viel größer ist, müssen die Werte für die Carman-Kozeny-Konstante kleiner werden. Die Dichte der Pellets verändert sich kaum über die Grammatur. Der Dichteunterschied zwischen Anfang und Ende der Messung beträgt rund 200 kg/m³. Die Gleichung für die Carman-Kozeny-Konstante lautet:

$$(14) \quad K = \frac{(1 - \varepsilon_s)^3}{\kappa \cdot \varepsilon_s^2 \cdot \theta_{s,v}^2} = \frac{(1 - \varepsilon_s) \cdot d_h^2}{16 \cdot \kappa}$$

ε_s ... Packungsdichte

d_h ... hydraulischer Durchmesser [m]

κ ... Permeabilität [m²]

$\theta_{s,v}$... volumensbezogene spezifische Oberfläche [m²/m³]

VOMHOFF [7] hat in seiner Arbeit die modifizierte Permeabilität κ_m -siehe Formel (15)- eingeführt. Sie unterscheidet sich von der Permeabilität, κ aus der Darcy Gleichung, Formel (8), durch die Verwendung der Grammatur, statt der durchströmten Länge. Die

modifizierte Permeabilität ist sehr stark von Grammaturn und Druck abhängig. In Abbildung 4-1 ist diese Abhängigkeit am Beispiel eines SBK, ein gebleichter leicht gemahlener Nadelholz Zellstoff, dargestellt. Die Messung wurde mit einer Permeabilitätszelle durchgeführt, in ihr stellt sich der Trockengehalt der Probe mit dem angepressten Druck ein. Somit ist der Druck gleichzusetzen mit dem Strukturwiderstand.

$$(15) \quad \kappa_m = \eta \cdot \frac{Q \cdot W}{A \cdot \Delta p_h} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]$$

η ... dyn. Viskosität [Pa s]

W ... Grammaturn [kg/m²]

Q ... Volumenstrom [m³/s]

A ... Querschnittsfläche [m²]

Δp_h ... hydraulische Druckdifferenz [Pa]

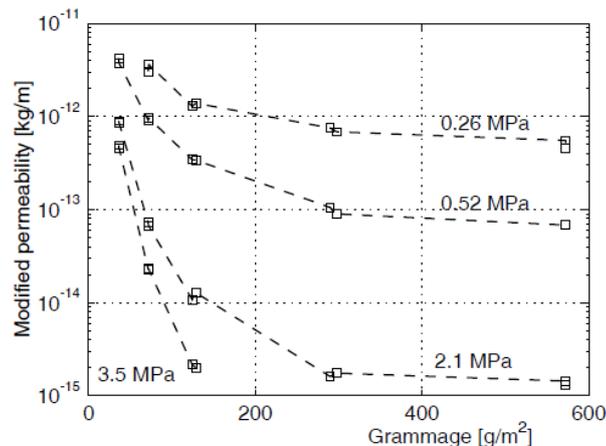


Abbildung 4-1: Abhängigkeit der Permeabilität von Grammaturn und Druck [7]

Ab rund 600 g/m² wird die so genannte „bulk permeability“ erreicht, der Bereich indem die Permeabilität nicht mehr von der flächenbezogenen Masse abhängig ist. Das Ansteigen der Permeabilität bei niedrigen Grammaturnen wird durch das Vorhandensein hoch durchlässiger Fließkanäle erklärt. Diese entstehen durch eine unterschiedliche Verteilung des aufgetragenen Druckes (siehe Abbildung 4-2) [7].

In der Arbeit von VOMHOFF [7] wird mit einer Permeabilitätszelle gearbeitet. Das Wasser passiert dabei ein Kontaktmaterial (Sieb, Sinterplatte, etc.) dann das Papier und wieder ein Kontaktmaterial. Somit ist das Papier an beiden Seiten mit rauen Materialien in Kontakt. Im FXP drückt ein Metallkolben gegen Stoffprobe und Metallsieb. Dadurch erreicht man eine Vergleichmäßigung der Druckverteilung, und der Unterschied zwischen hohen und niedrigen flächenbezogenen Massen sollte nicht mehr so groß sein. Im Diagramm 4-7 sind die modifizierten Permeabilitäten des Stoffes „LF/DIP 2“ über die flächenbezogene Masse aufgetragen. Es sind 2 unterschiedliche Trockengehaltsschritte bei 3 und 9 MPa dargestellt. Die Abhängigkeit zwischen Permeabilität und Trockengehalt ist sehr deutlich. Geht man davon aus, dass die in Abbildung 4-1 angegebenen Drücke einen Strukturdruck und somit einen Trockengehalt wiedergeben, so ist auch dort eine Trockengehaltsabhängigkeit zu erkennen. Die modifizierten Permeabilitäten, die sich aus den Messungen der FXP ergeben haben, passen größenordnungsmäßig gut zu denen von VOMHOFF, Abbildung 4-1. Es ist

auch deutlich zu erkennen, dass man bei den Messungen mit der FiberXPress im Bereich der grammaturunabhängigen „bulk permeability“ liegt. Beim Extrapolieren des Parameters k für geringere Grammaturen wird dieser größer. Dies liegt am Ansteigen der Permeabilität, das das kleiner werden der Kozeny-Konstante zufolge hat.

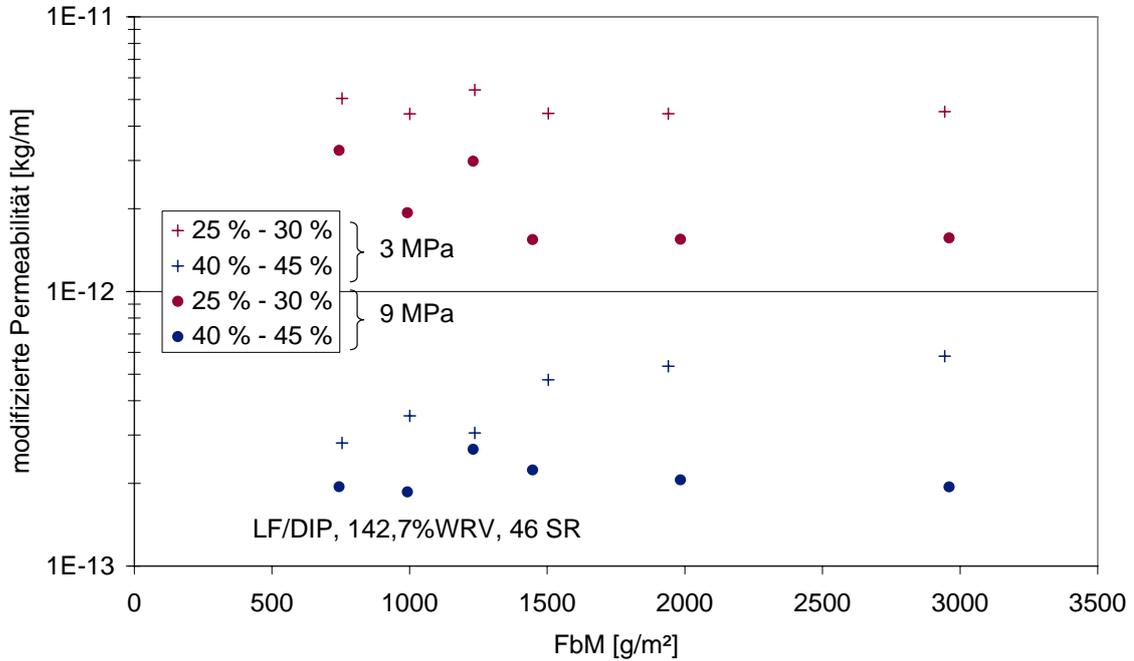


Diagramm 4-7: Druck- und Trockengehaltsabhängigkeit der modifizierten Permeabilität

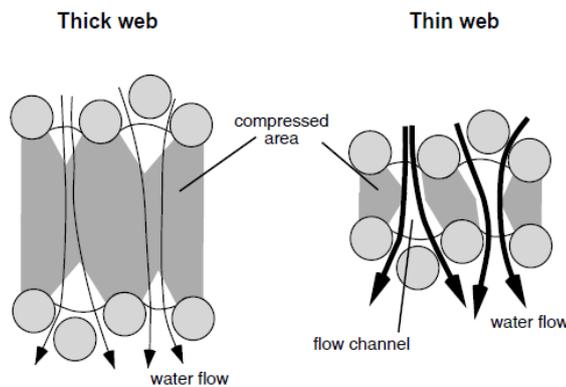


Abbildung 4-2: Grammaturnabhängiger Fluss durch das komprimierte Fasernetzwerk [7]

4.3.2 Parametersuche für alle Grammaturen in einem Druckbereich

Wird innerhalb eines Drucks für alle Grammaturen ein Parametersatz gesucht, macht sich eine Abweichung zwischen Versuch und Modell bemerkbar. Die Anzahl der Parameter wird von 18 (6 Grammaturen bei 3 Drücken) auf 3 reduziert. Es wird ebenfalls der Eingangstrockengehalt konstant gehalten. Zusätzlich wird das Quadrat des Flächengewichts durch einen Massenexponenten m ersetzt und ebenfalls durch den Solver bestimmt (siehe Tabelle 4-2, Seite 37).

$$TG(t+1) = LCM [FbM, PI(t), \Delta t=1, TG(t=1), k, c_L, m]$$

Um die Einheiten konsistent zu halten, muss die flächenbezogene Masse durch 1 kg/m^2 dividiert, und anschließend quadriert werden. In dem Bericht von KAMPER [33] hat sich gezeigt, dass der Trockengehalt nicht mit dem Quadrat der flächenbezogenen Masse einhergeht. Vergleicht man zum Beispiel die Entwässerung eines Zellstoffs mit einem Altpapier, so benötigt der Zellstoff viel mehr Zeit für die Entwässerung, da das in der Faser gebundene Wasser viel schwerer zu entfernen ist [24].

Um dieses stoffspezifische Verhalten zu berücksichtigen, ist der quadratische Massenexponent, der im LCM aufgrund der Darcy Gleichung enthalten ist, durch den Massenexponenten m ersetzt worden.

$$(16) \quad c_N = c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \left[\frac{\text{kg}^2}{\text{m}^4} \right] \cdot I [\text{Pa} \cdot \text{s}]}{\eta [\text{Pa} \cdot \text{s}] \cdot \left(\frac{W \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]}{1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]} \right)^m \cdot \left(1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] \right)^2} + \frac{1}{(c_L - c_S)^2}}$$

In Diagramm 4-8 ist dargestellt, wie gut das Modell die Messdaten beschreibt. Im Vergleich zu Diagramm 4-4 ist nun eine stärkere Abweichung erkennbar. Dies ist aber plausibel, da nun nicht mehr für jede Messreihe ein eigener Parametersatz vorhanden ist. Das Diagramm der 3 bzw. 9 MPa Messung ist im Anhang (Seite 81) zu finden.

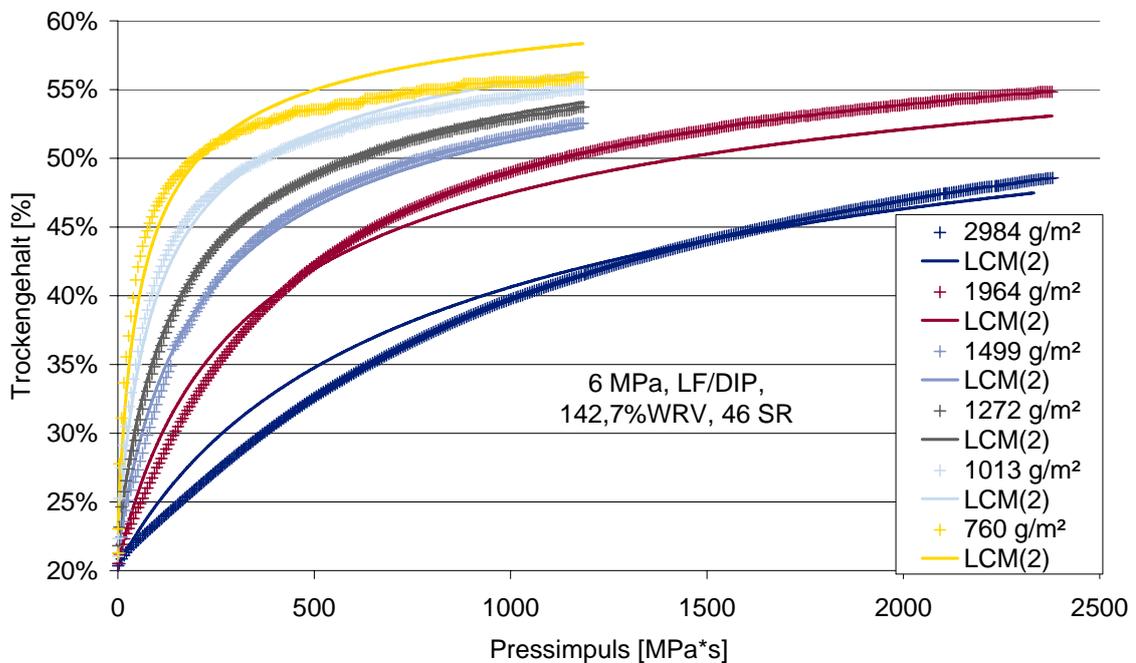


Diagramm 4-8: Vergleich zwischen Messdaten und Modell für alle FbM innerhalb eines Drucks

Um die Modellergebnisse untereinander vergleichen zu können, wird die Standardabweichung berechnet. Sie ist ein Maß für die Streuung der Werte um ihren Erwartungswert, der hier der Messwert aus der FiberXPress Messung ist. Die Standardabweichung besitzt die gleiche Einheit wie die Messpunkte, also % Trockengehalt.

$$(17) \quad \sigma [\%] = \sqrt{\frac{\text{Summe der Fehlerquadrate}}{\text{Anzahl der Fehlerquadrate}}} \cdot 100$$

Wird die Standardabweichung σ für die Messdaten aus Diagramm 4-8 berechnet, so erhält man einen Wert von 1,8%. Geht man von einer Normalverteilung aus, so bedeutet dies, dass für 68,3% der Messwerte der Modellfehler weniger als $\pm 1,8\%$ TG beträgt.

Die 3 Parametersätze der unterschiedlichen Drücke sind im Diagramm 4-9 aufgetragen. Der Parameter k reagiert am sensibelsten auf eine Druckveränderung, er wird mit steigendem Druck kleiner. Die übrigen Parameter sind nicht unabhängig voneinander, da der Massenexponent m sowie der Grenzrockengehalt c_L mit kleiner werdenden k ansteigen.

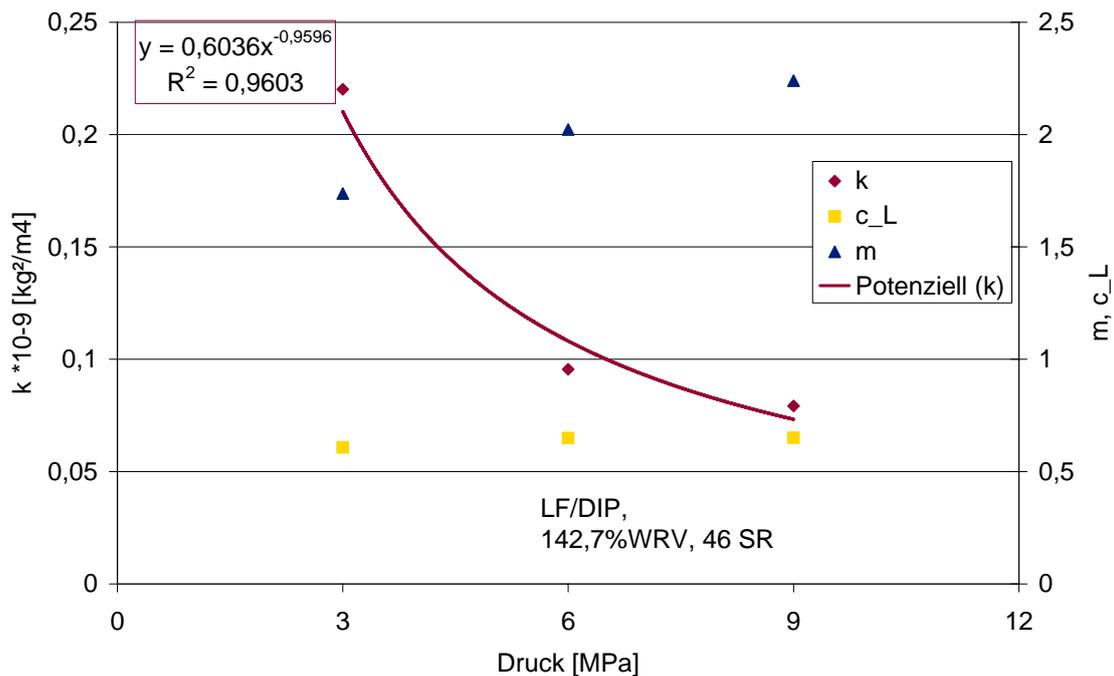


Diagramm 4-9: Druckabhängigkeit der Parameter

Im Diagramm 4-7 sind die modifizierten Permeabilitäten von zwei verschiedenen Drücken dargestellt. Die Permeabilität bei 3 MPa liegt etwas höher als bei 9 MPa, die Differenzen sind aber sehr klein. Der wesentliche Unterschied wird durch die Erhöhung des Trockengehalts hervorgerufen. Weiters könnte das Ansteigen der Packungsdichte mit steigendem Druck für einen kleiner werdenden Parameter k verantwortlich sein. Um dies zu untersuchen, werden die Dicken bei gleichen Trockengehalten, aber unterschiedlichen

Drücken miteinander verglichen, Diagramm 4-10. In diesem Fall wurde nicht der Stoff „LF/DIP 2“ verwendet sondern „LF/DIP 3“. Die Dicke wird mit Hilfe eines Potentiometers gemessen. Bei den Messungen war dieses nicht kalibriert, somit sind die Dickenwerte qualitativ zu betrachten. Der Verlauf der Dicke über die flächenbezogene Masse, die Änderung mit höherem Druck und das Verhalten mit steigendem Trockengehalt sind aber trotzdem gut zu beobachten. Der Dickenunterschied zwischen den zwei Drücken liegt bei rund 0,3 mm. Die beiden Möglichkeiten, um einen sinkenden Parameter k zu interpretieren, ergeben beide nur kleine Unterschiede bei höherem Druck, verlaufen aber in die erwarteten Richtungen.

Eine weitere Möglichkeit ist, dass das Metallsieb bei höherem Druck weniger durchlässt.

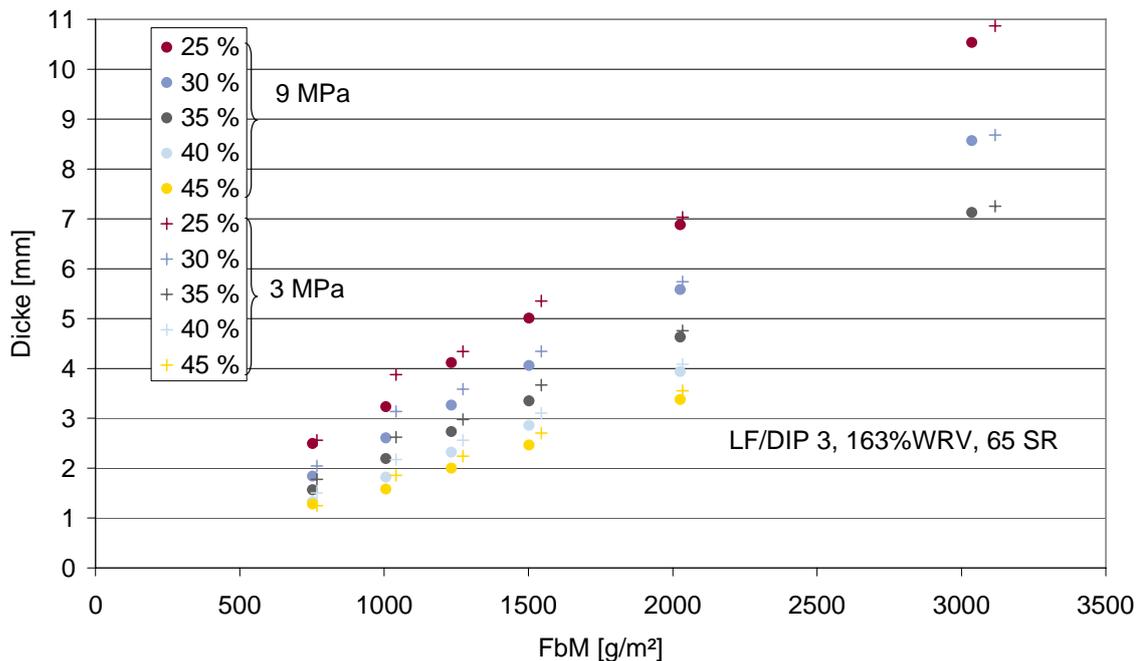


Diagramm 4-10: Dicke in Abhängigkeit der Grammaturn und des Drucks bei gleichen Trockengehalt

4.3.3 Parametersuche für alle Grammaturn und Drücke

Der nächste Schritt ist die Suche eines einzigen Parametersatzes für alle Drücke und Flächenmassen. Die Bedingungen sind gleich wie vorher, der Eingangstrockengehalt bleibt konstant, der Druckimpuls wird verändert, gesucht werden k , c_L und m (siehe Tabelle 4-2, Seite 37).

$$TG(t+1) = LCM [FbM, PI(t), \Delta t=1, TG(t=1), k, c_L, m]$$

Vergleicht man die Diagramme der 3 und 6 MPa Verläufe (Diagramm 4-11 und Diagramm 4-12), so fällt auf, dass das Modell bei 3 MPa unterschätzt und bei 6 MPa überschätzt. Das Diagramm des 9 MPa Verlaufes ist im Anhang (Seite 82) zu finden. Eine Ausnahme ist die 755 g/m² Kurve im 3 MPa Diagramm. Der Verlauf ist aber ohnehin etwas zweifelhaft, da die 1001 g/m²-Kurve einen höheren Trockengehalt erreicht.

Der Excel Solver ermittelte folgende Werte für die drei Parameter:

$$k = 0,192 \cdot 10^{-9} \text{ [kg}^2/\text{m}^4\text{]}$$

$$c_L = 61,09\%$$

$$m = 2,169$$

Die Standardabweichung beträgt 2,58%.

Beim Betrachten der Diagramme wird klar, dass sich ein höherer Druck anders auf den Verlauf der Trockengehaltskurve auswirkt und nicht allein durch den Pressimpuls beschrieben werden kann. Vergleicht man die erreichten Trockengehalte bei einem Pressimpuls von 1000 MPa s, ist zu erkennen, dass bei 3 MPa ~47% erzielt werden und bei 6 MPa ~39%.

In das Limiting-Consistency Model geht aber nur der Pressimpuls ein und nicht der Druck selbst.

Wenn man nur einen Parametersatz für unterschiedliche Drücke erhalten will, müsste im Modell auch der Druck berücksichtigt werden.

Nach den ersten Versuchen der Parameteridentifikation stellte sich heraus, dass das Modell sehr gute Ergebnisse liefert, wenn für jede FbM ein Parametersatz gesucht wird.

Geht man aber einen Schritt weiter und versucht innerhalb eines Drucks für alle Grammaturen einen Parameter zu finden fallen die Ergebnisse deutlich schlechter aus.

Weiters stellte sich heraus, dass im Modell der aufgebrauchte Druck nicht berücksichtigt wird, dies aber nötig ist, wenn man einen Parametersatz für alle Drücke und flächenbezogenen Massen finden will.

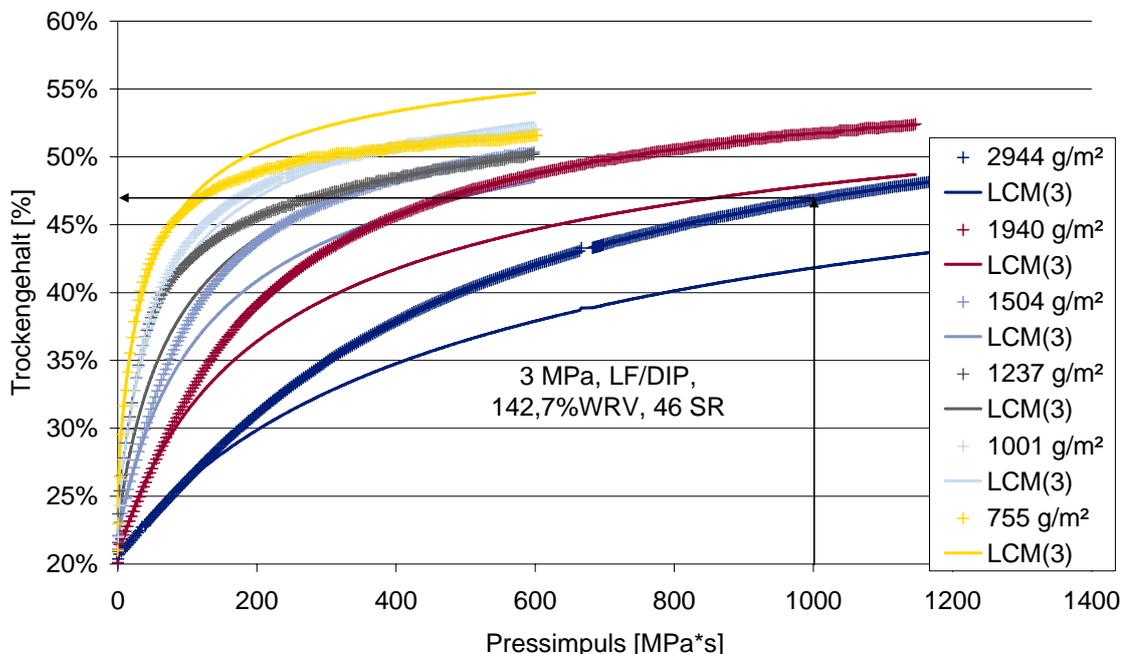


Diagramm 4-11: Vergleich der Messwerte und dem globalen Parametersatz

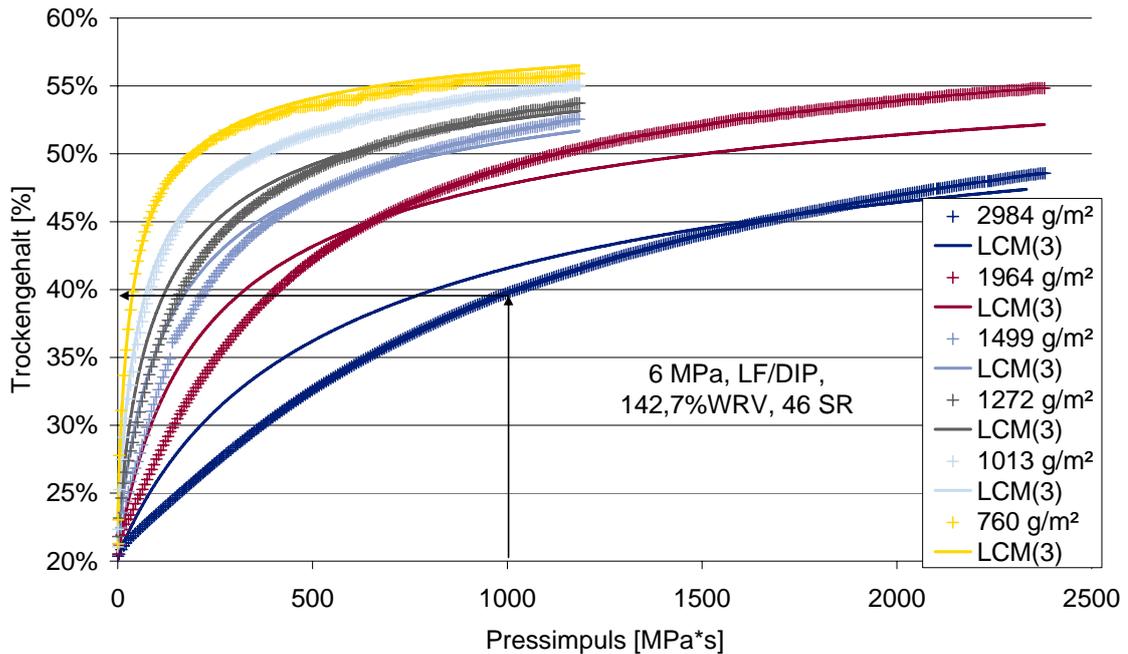


Diagramm 4-12: Vergleich der Messwerte und dem globalen Parametersatz

4.4 Erweiterung des Limiting-Consistency Modells

4.4.1 Hinzufügen eines Druckexponenten

Wie im vorherigen Kapitel erwähnt, wird nun versucht, das Modell so zu verändern, dass der maximal aufgebrachte Druck eingeht. Deshalb wird nun der Druckexponent d eingeführt, der die Druckabhängigkeit des Grenztrockengehaltes beschreibt (siehe Tabelle 4-2, Seite 37).

Auch in der Arbeit von HOLSTEGE [26] wurde eine potenzielle Abhängigkeit zwischen limitierendem Trockengehalt und dem aufgebrachten Druck gefunden.

Der Druckexponent von 0,11 in Holsteges Arbeit ist vergleichbar mit dem gefundenen Druckexponenten von Kraftliner.

Bei einem ähnlichen Problem, die Modellierung der Presse mit dem MTS-Tester, stellte sich diese Erweiterung als die beste heraus [25].

(18)

$$c_N = c_L \cdot \left(\frac{p_{\max} [\text{MPa}]}{1 \text{MPa}} \right)^d - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \left[\frac{\text{kg}^2}{\text{m}^4} \right] \cdot \left(\frac{p_{\max} [\text{MPa}]}{1 \text{MPa}} \right)^{-2} \cdot I [\text{Pa} \cdot \text{s}]}{\eta [\text{Pa} \cdot \text{s}] \cdot \left(\frac{W \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]}{1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]} \right)^m \cdot \left(1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] \right)^2} + \left(c_L \cdot \left(\frac{p_{\max} [\text{MPa}]}{1 \text{MPa}} \right)^d - c_S \right)^2}}$$

Deshalb wird auch hier diese Form verwendet.

$$TG(t+1) = LCM [FbM, PI(t), \Delta t=1, TG(t=1), k, c_L, m, d]$$

Damit kein Dimensionsproblem entsteht wird p_{max} durch 1MPa dividiert.

Der erreichbare Grenztrockengehalt c_L ist nun vom Druck abhängig. Außerdem ist zu beachten, dass der durch den Excel-Solver gefundene Wert für c_L noch nicht mit der Erweiterung für den Druck multipliziert ist. Der Trockengehalt kann also über c_L hinausgehen.

Die Lösung des Excel-Solvers für die vier Parameter ist folgende:

$$k = 3,723 \cdot 10^{-9} \text{ [kg}^2/\text{m}^4\text{]}$$

$$c_L = 49,18 \%$$

$$m = 2,024$$

$$d = 0,1502$$

Die Standardabweichung beträgt 1,52%.

Vergleicht man Diagramm 4-13 und Diagramm 4-14 mit denen ohne Druckerweiterung (Diagramm 4-11, Diagramm 4-12), kann das Modell die gemessenen Versuche noch immer nicht sehr gut beschreiben, eine Verbesserung ist jedoch erkennbar. Das Diagramm des 9 MPa Verlaufes ist im Anhang (Seite 82) zu finden.

Speziell an der Standardabweichung die sich von 2,58% auf 1,52% reduziert ist der positive Effekt der Modellerweiterung zu bemerken.

Da die Krümmungen des LCM sich noch nicht optimal anpassen, könnte eine weitere Modellerweiterung weiterhelfen.

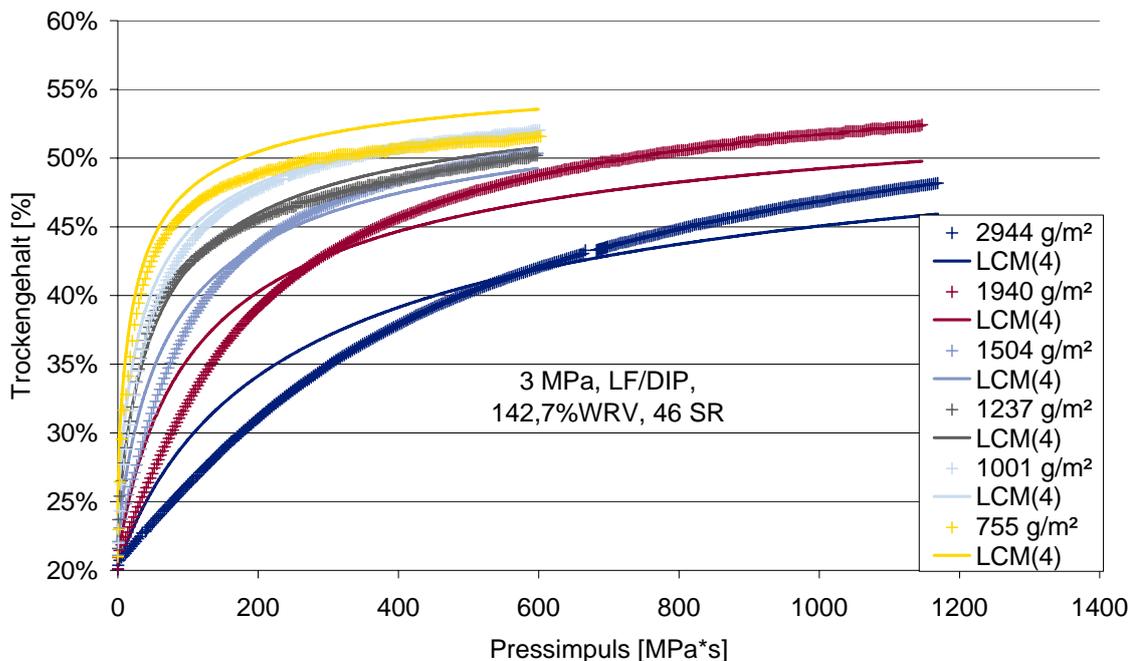


Diagramm 4-13: Vergleich der Messwerte und dem globalen Parametersatz mit Druckerweiterung

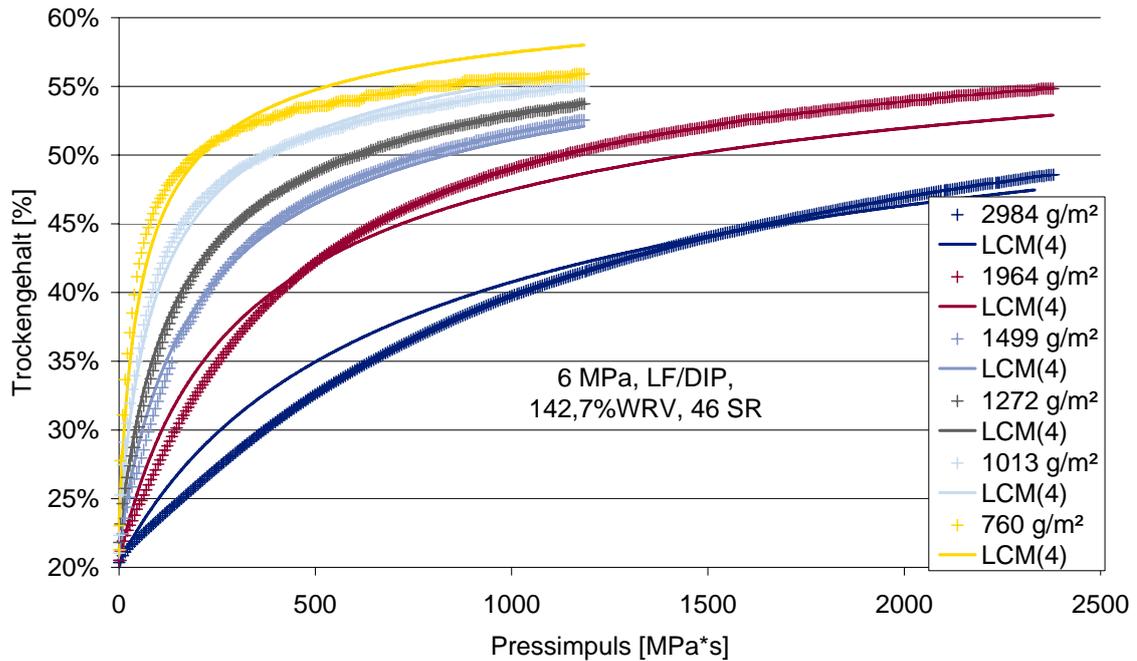


Diagramm 4-14: Vergleich der Messwerte und dem globalen Parametersatz mit Druckerweiterung

4.4.2 Hinzufügen eines Impulsexponenten

Für eine weitere Veränderung stehen noch die dynamische Viskosität und der Druckimpuls zur Auswahl. Da sich die Temperatur bei den Versuchen nicht verändert und sie auch während der Messung konstant gehalten wird, liefert die Viskosität einen konstanten und geringen Beitrag im Term.

Der Druckimpuls ist von der Zeit abhängig und könnte deswegen für die Krümmung der Kurve relevant sein. Aus diesem Grund wird dem Druckimpuls der Exponent i beigefügt (siehe Tabelle 4-2, Seite 37).

$$TG(t+1) = LCM [FbM, PI(t), \Delta t=1, TG(t=1), k, c_L, m, d, i]$$

Es wurde auch versucht die Quadratwurzel durch eine beliebige Wurzel zu ersetzen. Dies blieb aber erfolglos, denn der Excel-Solver hat als Lösung immer ein Quadrat gefunden.

Um den Impuls bzw. die Zeit anders zu bewerten wird der Exponent i hinzugefügt, Formel (19).

Durch das Hinzufügen des Exponenten i muss ebenfalls durch 1 MPas dividiert und anschließend multipliziert werden. Es ergibt sich aber eine deutliche Verbesserung.

Der Excel-Solver hat folgende Werte für die Parameter gefunden:

$$k = 0,0035 \cdot 10^{-9} \text{ [kg}^2\text{/m}^4\text{]}$$

$$c_L = 49,60 \%$$

$$m = 3,001$$

$$d = 0,089$$

$$i = 1,420$$

Die Standardabweichung beträgt 1,15%.

$$c_N = c_L \cdot \left(\frac{p_{\max} [\text{MPa}]}{1 \text{MPa}} \right)^d -$$

$$(19) \quad \sqrt[1]{ \frac{k \left[\frac{\text{kg}^2}{\text{m}^4} \right] \cdot \left(\frac{p_{\max} [\text{MPa}]}{1 \text{MPa}} \right)^{-2} \cdot \left(\frac{I [\text{Pa} \cdot \text{s}]}{1 [\text{Pa} \cdot \text{s}]} \right)^i \cdot 1 [\text{Pa} \cdot \text{s}]}{\eta [\text{Pa} \cdot \text{s}] \cdot \left(\frac{W \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]}{1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]} \right)^m \cdot \left(1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] \right)^2} + \frac{1}{\left(c_L \cdot \left(\frac{p_{\max} [\text{MPa}]}{1 \text{MPa}} \right)^d - c_S \right)^2} }{1}$$

Um die Größenordnungen gleich zu halten wird durch das Hinzufügen des Exponenten i der Parameter k kleiner.

Im Diagramm 4-15 sind die 3 MPa Entwässerungsverläufe dargestellt. Vergleicht man diese mit Diagramm 4-13 vom vorherigen Kapitel ist speziell bei den niedrigen flächenbezogenen Massen ein Unterschied zu erkennen. Die Diagramme der 6 MPa bzw. des 9 MPa Messungen sind wieder dem Anhang (Seite 82) zu entnehmen.

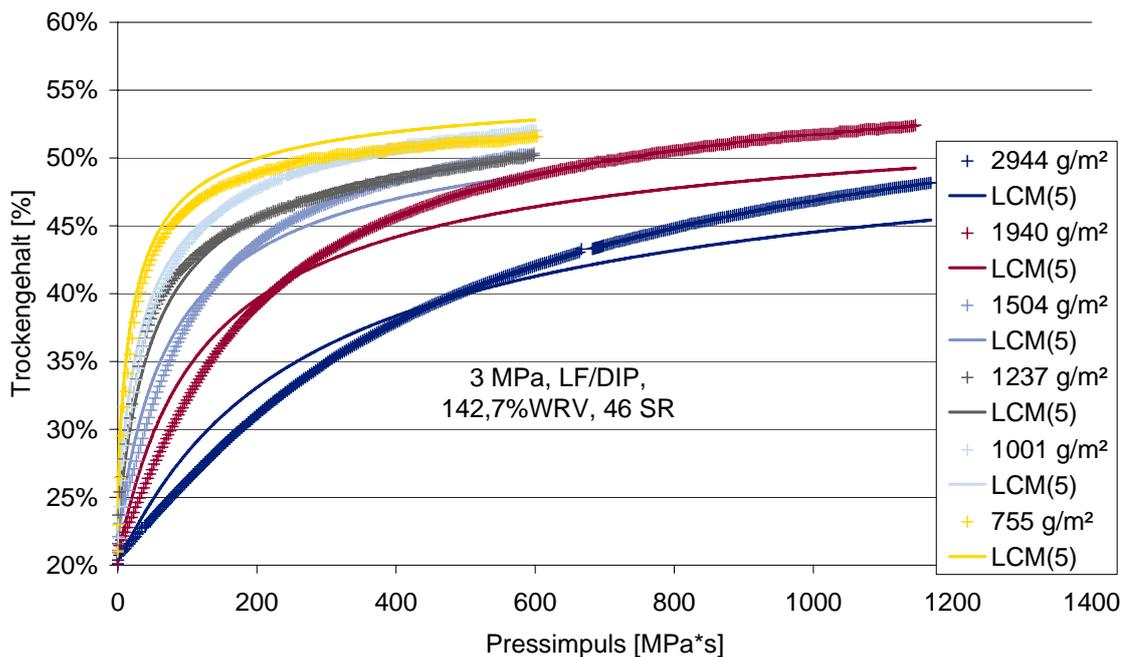


Diagramm 4-15: Vergleich der Messwerte und dem globalen Parametersatz mit Druck- und Impulserweiterung

In diesen ersten Versuchen ist immer von einem Starttrockengehalt von rund 20% ausgegangen worden. Das Modell muss so auch noch am Ende der Entwässerungskurve von ~20% wegrechnen.

In den nächsten Versuchen soll herausgefunden werden, ob es Verbesserungen gibt, wenn der Starttrockengehalt anders gewählt wird, und welche Möglichkeit am Besten geeignet ist.

4.4.3 Regelmäßige 5% Trockengehaltssteigerung

Aus den Messdaten wird in 5% Schritten der Trockengehalt mit dem dazugehörigen Pressimpuls herausgesucht. Begonnen wird mit 20%, dann 25% usw. bis zum letzten erreichten Trockengehalt. So erhält man am Anfang der Entwässerungskurve viele Punkte und gegen Ende weniger.

$$TG(TG+5\%) = LCM [FbM, PI(TG), \Delta TG=5\%, TG, k, c_L, m, d, i]$$

Die Daten werden dann schrittweise in die Formel (19) eingesetzt. Als erstes ist der Starttrockengehalt 25%, dann 30%, 35%... Für den Starttrockengehalt wird immer der gemessene Wert verwendet und nicht der mit dem Modell errechnete Wert.

Statt dem Gesamtpressimpuls wird jetzt die jeweilige Differenz in die Formel eingesetzt.

Mit dieser Vorgehensweise muss das Modell immer nur 5% Schritte vorhersagen.

Im Diagramm 4-16 ist wie schon zuvor der Stoff: LF/DIP 2, 46 SR bei 6 MPa dargestellt. Die Kreuze sind die Messpunkte aus den Entwässerungsversuchen mit der FiberXPress, die Punkte die berechneten Modellpunkte. Um die Modellvarianten besser auseinanderhalten zu können, wird der Index (5/5%) vergeben. Dies bedeutet Modellvariante 5 (siehe Tabelle 4-2, Seite 37) mit der gewählten Startbedingung der 5% Trockengehaltsschritte.

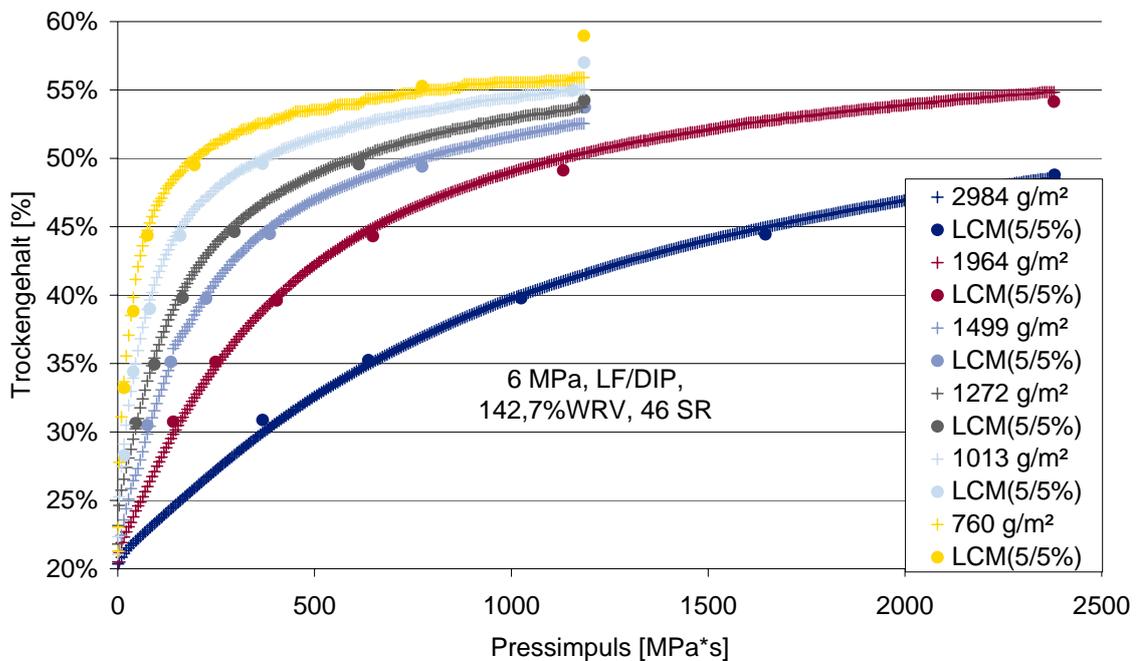


Diagramm 4-16: Vergleich des Modells mit 5% TG-Schritten mit den Messdaten

Die meisten Punkte liegen gut auf den Messkurven. Bei den Grammaturen, 760 und 1013 g/m², fällt auf, dass die letzten Modellpunkte stark von den Messkurven abweichen. Hier ist schon ein Problem dieser Methode erkennbar. Die letzten Messpunkte der niedrigen Grammaturen weisen keine 5% Schritte mehr auf, das Modell berechnet aber trotzdem einen 5%igen Sprung. Daraus lässt sich vermuten, dass sich das Modell auf diese 5% Sprünge „trainiert“ hat.

Die Werte der Parameter weichen sehr stark von den bisherigen ab. Vor allem der Parameter k ist um einige Zehnerpotenzen größer als bei den anderen Versuchen.

$$k = 128919,2 \cdot 10^{-9} \text{ [kg}^2\text{/m}^4\text{]}$$

$$c_L = 57,1 \%$$

$$m = 0,462$$

$$d = 0,406$$

$$i = 0,219$$

Die Standardabweichung ist sehr klein mit 0,861%.

4.4.4 Aufteilung in Zeitabschritte

Nachdem das Modell mit Impulserweiterung schon ganz gute Ergebnisse liefert, die Parameter des Versuchs konstante TG-Schritte zu berechnen aber nicht ins Bild passen, wird versucht dieses Modell auch auf nicht konstante TG-Schritte anzuwenden. So kann festgestellt werden, ob die Parameter auch für ungleichmäßige kleinere Schritte geeignet sind.

$$TG(t+ZS) = LCM [FbM, PI(ZS), \Delta t=ZS, TG(ZS), k, c_L, m, d, i]$$

Um keine gleich großen Trockengehaltsschritte zu haben, wird nach bestimmten Zeitabständen der Trockengehalt und der Pressimpuls herausgesucht, die Abkürzung ZS steht für diese Zeitschritte. Ausgehend vom ersten Trockengehalt wird versucht den nächsten mit dem Modell zu berechnen. Die Parameter die in Kapitel 4.4.3 gefunden wurden, werden nun in der Berechnung verwendet. Es werden beliebige Zeitabstände gewählt und der dazugehörige Pressimpuls und Trockengehalt aus den Messdaten ermittelt. Mit diesen Daten wird die Modellberechnung schrittweise durchgeführt.

Im Diagramm 4-17 sind die Entwässerungskurven des Versuchs (Kreuze) und die Punkte des Modells aufgetragen. Der erste Index des Modells LCM(ZS, 5%) gibt die Testmenge an, der zweite steht für den verwendeten Parametersatz. Speziell am Anfang macht sich eine große Abweichung bemerkbar.

Die Trockengehaltssprünge sind zu Beginn besonders groß und können bis zu 25% betragen. Die Parameter die bei den 5% TG-Sprüngen ermittelt wurden sind dafür nicht geeignet. Somit ist die erste Vermutung, dass sich das Modell auf 5% Schritte „trainiert“ hat, bestätigt worden. Auch die Standardabweichung ist mit 3,2% viel größer.

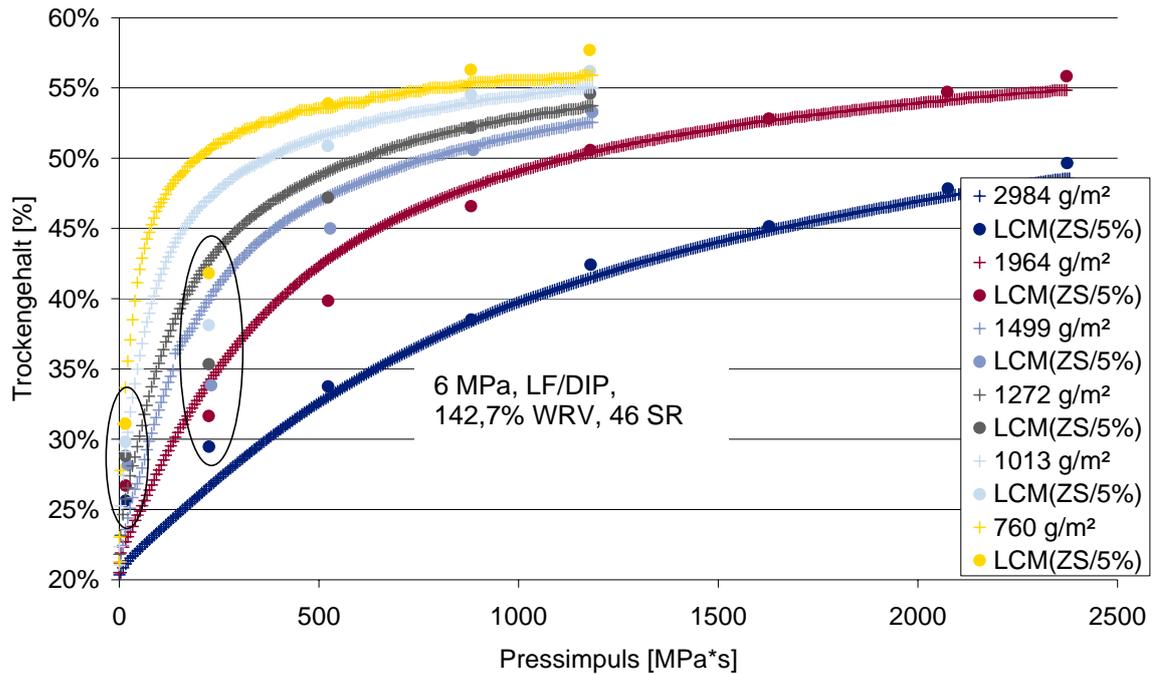


Diagramm 4-17: Versuch die Parameter 5% TG-Schritte auf andere TG-Schritte anzuwenden

Wenn für den Versuch: „Zeitschritte“ die Parameter gesucht werden erhält man folgendes Ergebnis:

$$k = 0,6229 \cdot 10^{-9} \text{ [kg}^2\text{/m}^4\text{]}$$

$$c_L = 47,7 \%$$

$$m = 2,257$$

$$d = 0,151$$

$$i = 1,107$$

Die Standardabweichung beträgt 1,11%

Im Diagramm 4-18 sind folgende Daten dargestellt:

- Messkurven,
- Werte des Modells „Zeitschritte“ (LCM(ZS)),
- Modellkurven mit Startwert 20% über gesamten Pressimpuls (LCM(5))

Die Modelle sind jeweils mit ihren eigenen Parametern berechnet worden.

Welche der beiden Varianten die bessere ist aus der Grafik schwer zu bewerten. Zieht man die beiden Standardabweichungen für den Vergleich heran, fällt die Entscheidung zu Gunsten der Variante mit dem gleichbleibenden Starttrockengehalt von ~20% aus.

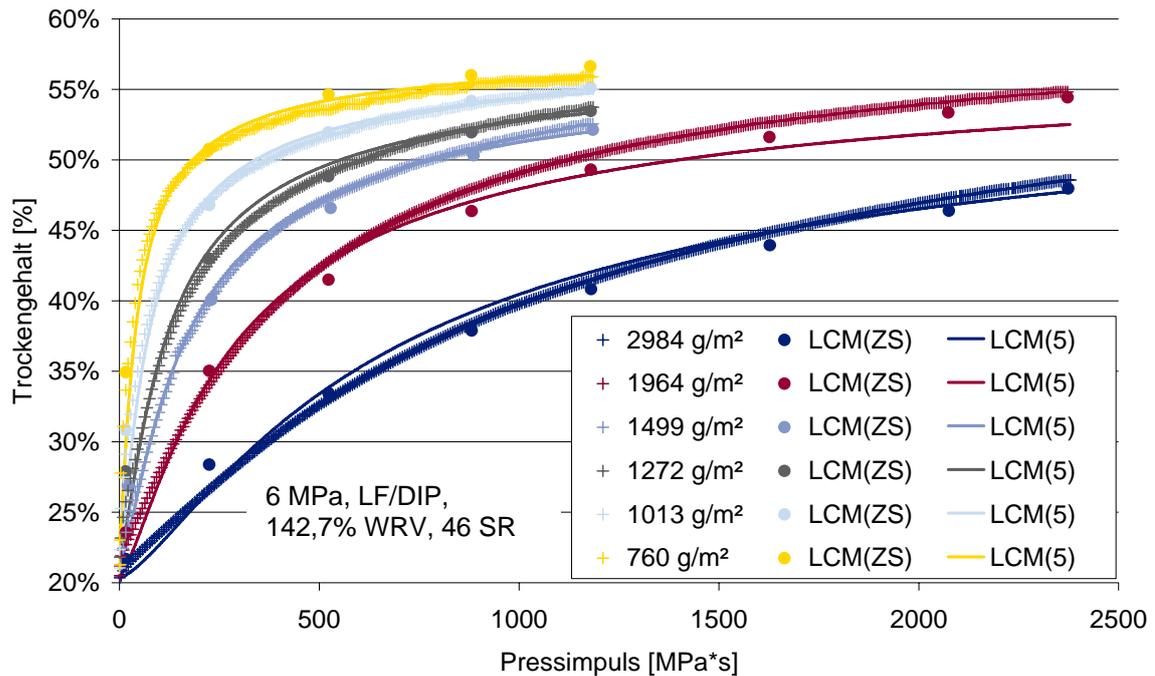


Diagramm 4-18: Modellvergleich zwischen 20% Starttrockengehalt und der schrittweisen Berechnung

4.4.5 Validierung und Integrierbarkeit des Modells

Um zu testen welche der Modellerweiterungen am Besten einsetzbar ist, werden die Parameter, die bei den verschiedenen Modellen gefunden wurden, in die Testmenge des Versuchs: *Zeitschritte* (Kapitel 4.4.4) eingesetzt.

Dadurch wird gleichzeitig die Integrierbarkeit des erweiterten LC-Modells getestet. Die Voraussetzung für die Integrierbarkeit ist, dass man innerhalb des Modells bleibt, also nicht die Messwerte für die schrittweise Berechnung heranzieht. Ansonsten wird bei jedem Schritt eine Fehlerkorrektur durchgeführt.

Darum wird bei diesen Versuchen nur für den ersten Schritt der Messwert herangezogen. In den darauffolgenden wird der Trockengehalt, den das Modell berechnet hat als Starttrockengehalt eingesetzt.

Als erstes wird das Modell mit Druck- und Impulserweiterung getestet. Die Testpunkte des Versuchs: *Zeitschritte* mit den Parametern des Versuchs: *Starttrockengehalt 20%* berechnet und umgekehrt.

Im Diagramm 4-19 ist das Modell mit Impuls-, Druck-, und Massenerweiterung dargestellt. Die Indizes der Modelle geben die Varianten an. Der erste Index gibt an welche Testmenge verwendet wird, der zweite welcher Parametersatz.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Parametersatz, der immer von einem Starttrockengehalt von 20% ausgeht, deutlich andere Ergebnisse liefert, wenn er in kleineren Schritten rechnen muss.

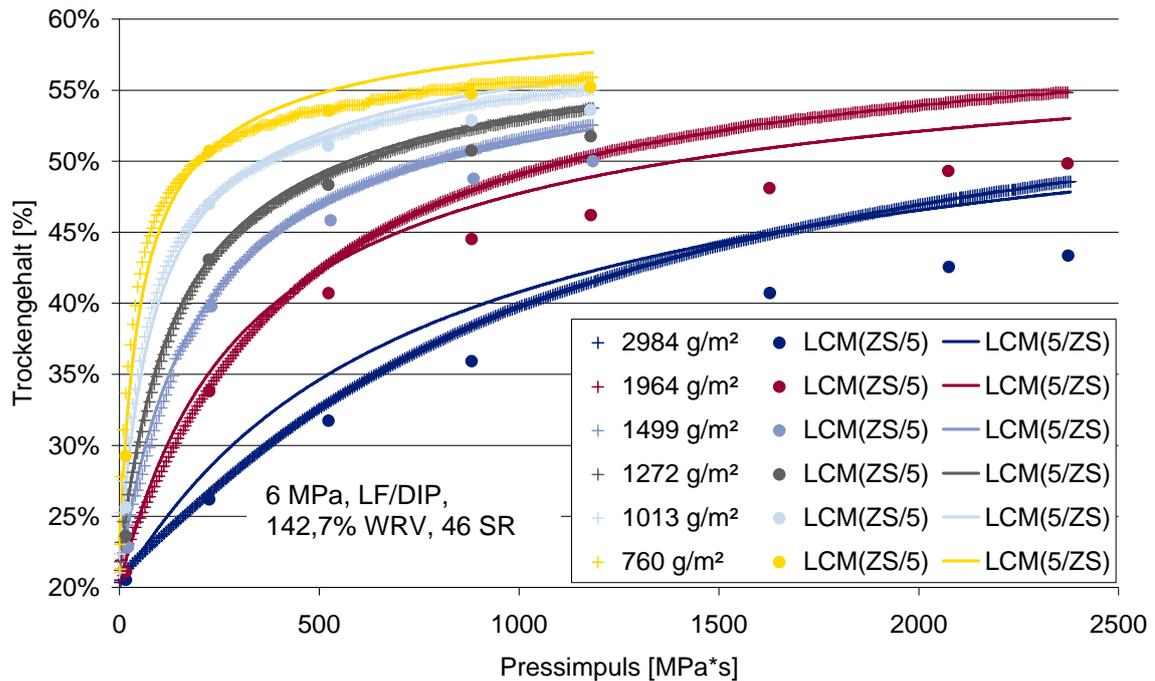


Diagramm 4-19: Gegenprüfung der Parameter- und Testmenge

Zur Überprüfung der Vermutung, dass durch die Modellerweiterungen Fehler eingeschleppt wurden, wird das original Modell (Formel(6)) ohne zusätzliche Exponenten ebenfalls schrittweise berechnet. Dazu wird der Parametersatz vom Kapitel 4.3.3 verwendet. Die Schritte sind wie in Kapitel 4.4.4 gewählt worden. Das Ergebnis zeigt, dass es ohne die zusätzlichen Exponenten keinen Unterschied macht, ob in kleinen Schritten oder in einem großen Impulsschritt gerechnet wird.

Dass das Modell im Originalzustand integrierbar ist, lässt sich auch analytisch beweisen.

$$\text{Zeitschritte: } c_{N1,ZS} = c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \cdot (I_1)}{\eta \cdot W^2} + \frac{1}{(c_L - c_s)^2}}} \quad c_{N2,ZS} = c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \cdot (I_2 - I_1)}{\eta \cdot W^2} + \frac{1}{(c_L - c_{N1})^2}}}$$

$$20\% \text{ Start TG: } c_{N2,20\%} = c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \cdot I_2}{\eta \cdot W^2} + \frac{1}{(c_L - c_s)^2}}}$$

$$\rightarrow c_{N2,20\%} = c_{N2,ZS}$$

$$c_{N2,ZS} = c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \cdot (I_2 - I_1)}{\eta \cdot W^2} + \frac{1}{\left(c_L - \left(c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \cdot (I_1)}{\eta \cdot W^2} + \frac{1}{(c_L - c_s)^2}} \right)} \right)^2}}} =$$

$$= c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \cdot (I_2 - I_1)}{\eta \cdot W^2} + \frac{k \cdot (I_1)}{\eta \cdot W^2} + \frac{1}{(c_L - c_s)^2}}} = c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \cdot (I_2)}{\eta \cdot W^2} + \frac{1}{(c_L - c_s)^2}}}$$

Die anderen Modellerweiterungen sind grafisch auf ihre Integrierbarkeit überprüft worden.

Das Hinzufügen des Massenexponenten hat keine Auswirkungen auf die Integrierbarkeit. Die Berechnungspunkte der schrittweisen Berechnung des Modells laut Formel (18), das einen Massen- und Druckexponenten enthält, liegen ebenso auf der Linie der „Startrockengehalt 20%“ Berechnung. Dies ist in Diagramm 4-20 grafisch dargestellt.

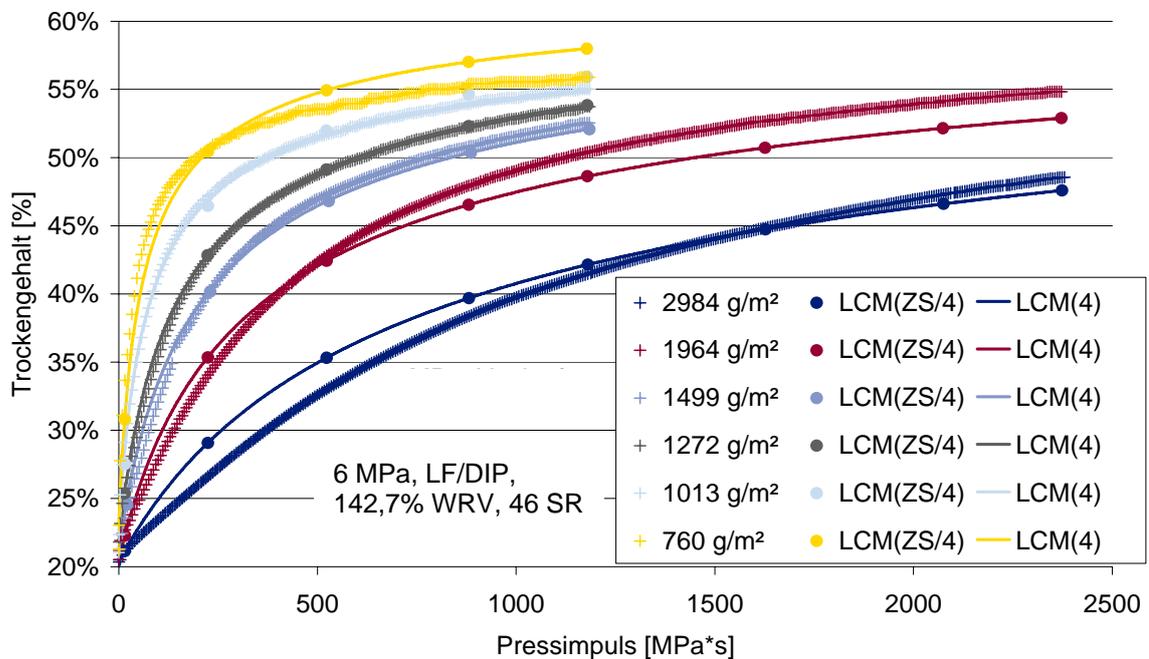


Diagramm 4-20: Integrierbarkeit des LC-Modells mit Druck- und Massenexponenten

Die Versuche zeigten, dass es erst nach der Einführung des Impulsexponenten einen gravierenden Unterschied zwischen der Berechnung in einem Schritt oder der in mehreren

Schritten gibt. Dies lässt sich damit begründen, dass durch den Impulsexponenten die Zeit verändert wird. Die anderen Erweiterungen sind integrierbar.

Aus diesem Grund wird das Modell mit der Erweiterung des Impulsexponenten nicht mehr weiter verwendet. Um die verschiedenen Stoffe zu untersuchen und miteinander zu vergleichen, wird das Modell mit Druckerweiterung, Formel (18), verwendet.

4.4.6 Berücksichtigung der Rückbefeuchtung

Die Versuche mit dem DIP-Stoff haben gezeigt, dass es eine Rückbefeuchtung durch Sieb und Kanüle gibt (siehe Kapitel 3.4.4). Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, wird wie in der Arbeit [25] dem Limiting-Consistency Model ein Rückbefeuchtungsterm R hinzugefügt.

$$c = \frac{1}{\frac{1}{c_N} + \frac{R}{W}}$$

Für die Berechnung von c_N wird das LC-Modell mit Druckerweiterung, Formel (18), verwendet.

Erste Versuche, das Modell mit Rückbefeuchtungsterm an die FXP Messdaten des DIP Stoffes anzugleichen, zeigten eine deutliche Verbesserung. Im Diagramm 4-21 sind die Messdaten des DIP Stoffes und das Modell ohne Rückbefeuchtung dargestellt. Vergleicht man die Ergebnisse mit denen im Diagramm 4-22, bei denen dem LC-Modell der Rückbefeuchtungsterm hinzugefügt wurde, ist die bessere Annäherung des Modells an die Messkurven sofort zu erkennen.

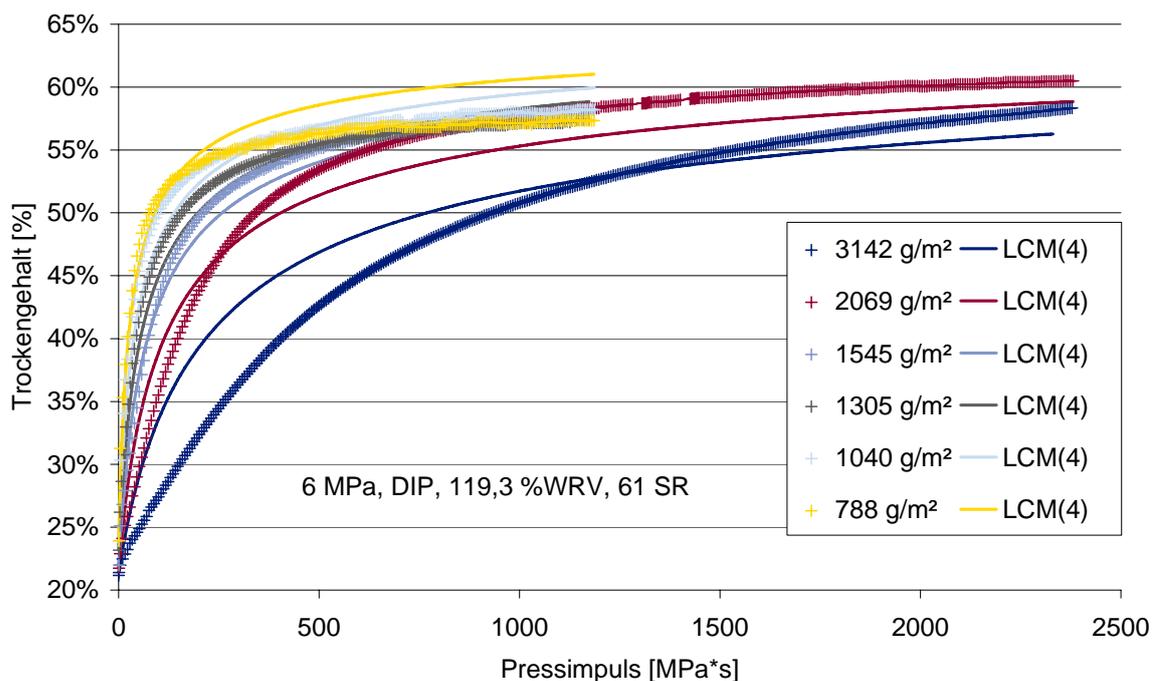


Diagramm 4-21: Modell ohne Rückbefeuchtungsterm, mit Druckexponent

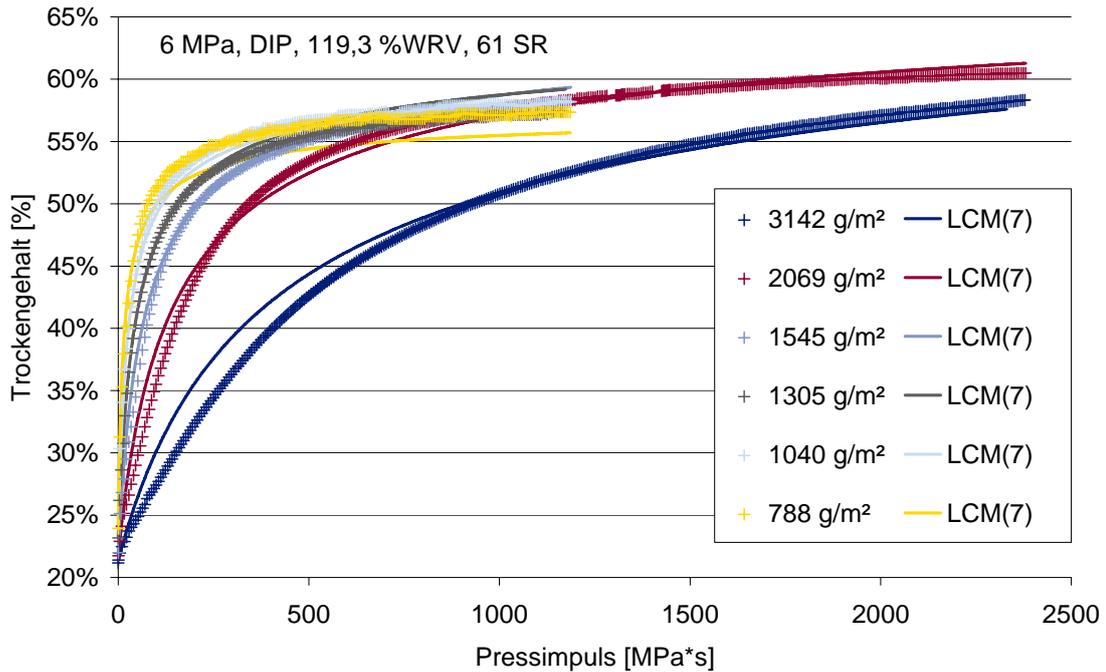


Diagramm 4-22: Modell mit Rückbefeuchtungsterm und Druckexponent

Nachdem bei diesem Stoff die Verbesserung so deutlich ist, wird auch bei den anderen Stoffen der Rückbefeuchtungsterm dem Modell mit Druckerweiterung hinzugefügt. Die Diagramme der weiteren Stoffe, welche die 6 MPa Messdaten mit dem Modell vergleichen, sind im Anhang ab Seite 83 zu finden. Im Diagramm 4-23 sind die erhaltenen Rückbefeuchtungsterme durch den Solver (blau), die Standardabweichung (rot) und die Differenz zur Standardabweichung ohne den Rewet-Term (gelb) dargestellt.

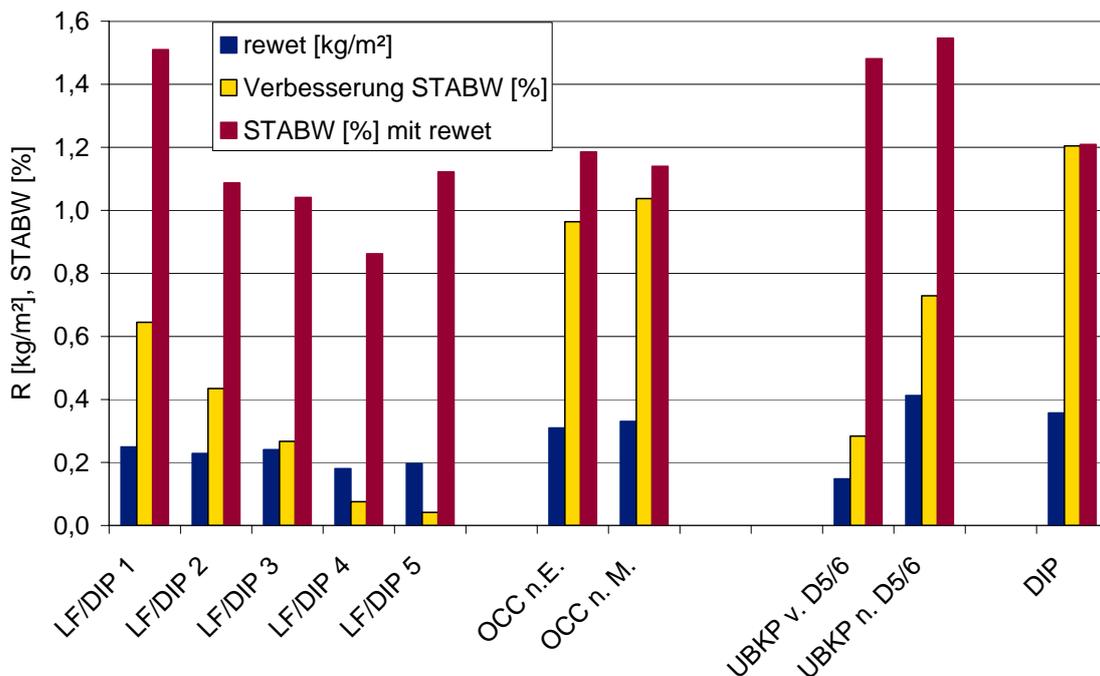


Diagramm 4-23: Veränderung der Standardabweichung durch den Rewet-Term

Die x-Achse enthält die Stoffbezeichnungen. Am größten ist die Differenz der Standardabweichung bei den OCC und DIP Stoffen. Vergleicht man den durch den Solver ermittelten Rückbefeuchtungsterm mit dem aus dem Laborversuch (vgl. Kapitel 3.4.4), so beträgt die experimentell bestimmte Rückbefeuchtung etwa die Hälfte. Im Versuch hat sich auch gezeigt, dass sich für den „UBKP vor D5/6“ keine Rückbefeuchtung bestimmen lässt. Der Solver bestimmt aber eine Rückbefeuchtung von 0,148 kg/m². Dies lässt darauf schließen, dass im Rückbefeuchtungsterm noch andere Geräteeigenschaften oder Stoffeigenschaften stecken.

Wie zu erkennen, ist die Differenz der Standardabweichung bei den OCC Stoffen und beim Stoff DIP durch die Einführung der Rückbefeuchtung am Größten. Auch die ermittelte Rückbefeuchtung fällt hier am Höchsten aus. Möglicherweise ist der erhöhte Füllstoffgehalt dieser beiden Stoffe dafür verantwortlich.

Der Abfall der Differenz der Standardabweichung bei den LF/DIP Stoffen, liegt wahrscheinlich am immer höher werdenden Mahlgrad. Dadurch wird die Entwässerung langsamer und die FiberXPress Messkurven werden flacher. Wenn der Entwässerungsvorgang durch die Entwässerungsgeschwindigkeit bestimmt wird, also im „flow-controlled“ Bereich liegt, ist der Einfluss der Rückbefeuchtung nicht zu erkennen.

Da die Parameter nicht unabhängig voneinander sind, sind im Diagramm 4-24 und Diagramm 4-25 die Änderungen der übrigen Parameter durch das Hinzufügen der Rückbefeuchtung dargestellt. Bei den LF/DIP Stoffen fällt auf, dass der Massenexponent nun höher liegt, sich aber auf einem sehr konstanten Niveau befindet. Auch bei den anderen Stoffen steigt der Massenexponent an. Der Druckexponent sowie der Grenzrockengehalt steigen ebenfalls leicht, unterscheiden sich aber nicht wesentlich.

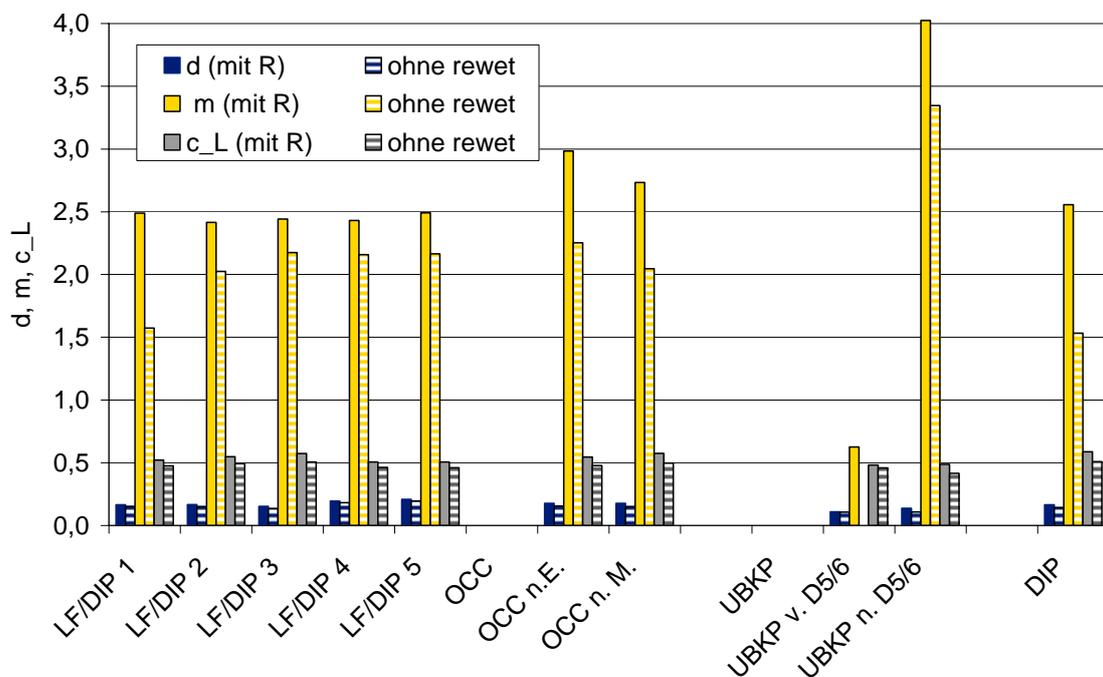


Diagramm 4-24: Veränderung der Parameter d, m und c_L durch den Rückbefeuchtungsterm

Der Parameter k wird bei allen Stoffen, mit Ausnahme von „LF/DIP 1“ und „UBKP vor D5/6“, kleiner. Bei den beiden Ausnahmen ist wahrscheinlich die starke Veränderung des Massenexponenten für die Zunahme von k verantwortlich.

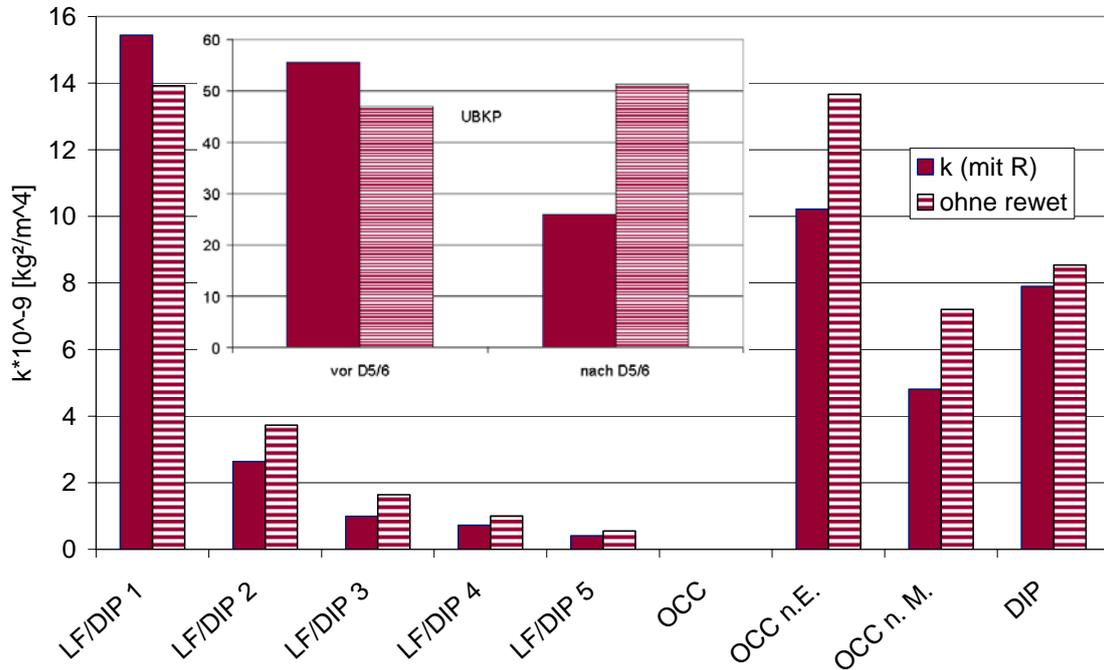


Diagramm 4-25: Veränderung des Parameters k durch die Rückbefeuchtung

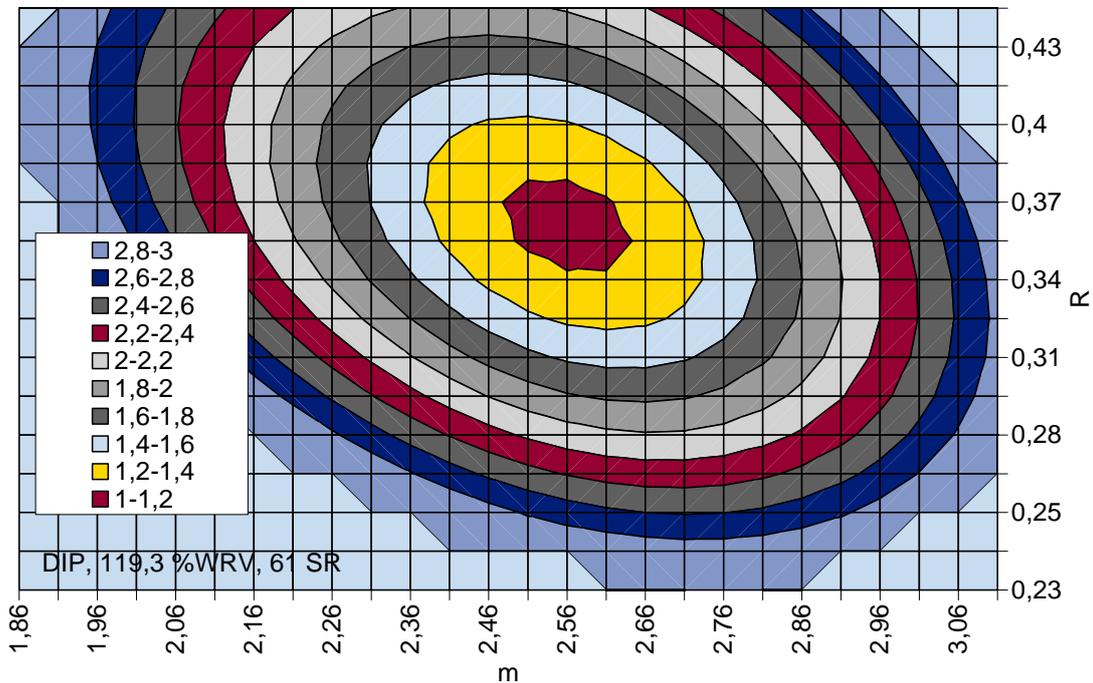


Diagramm 4-26: Sensitivitätsanalyse von m und R für den DIP Stoff

In Diagramm 4-26 ist die Abhängigkeit der Standardabweichung von den Parametern m und R für den DIP Stoff bei 6 MPa dargestellt. Weitere Sensitivitätsanalysen mit verschiedenen Kombinationen der Parameter sind dem Anhang (Seite 85) zu entnehmen.

Es ist keine große Abhängigkeit zwischen den Parametern zu sehen. Ein Versuch hat gezeigt, dass mit einer Erweiterung des Parameterbereichs kein anderes Minimum vorkommt. Die ermittelten Werte des Solvers $R= 0,357 \text{ kg/m}^2$ und $m= 2,56$ liegen im Minimum.

Bis jetzt wurde bei der Ermittlung des Rückbefeuchtungsterms als Starttrockengehalt der Messwert bei Sekunde 1 verwendet. Genau genommen müsste man aber auch beim Starttrockengehalt die Rückbefeuchtung berücksichtigen, da sich die Rückbefeuchtungseffekte auch auf diesen auswirken.

Wenn der Eingangstrockengehalt um den Rückbefeuchtungsterm korrigiert wird, müsste im Modell zu c_s der Rückbefeuchtungsterm ebenfalls hinzugefügt. Dies ist in Formel (20) vereinfacht, anhand des originalen LC-Modells, dargestellt:

$$(20) \quad c_N = c_L - \frac{1}{\sqrt{\frac{k \cdot I}{\eta \cdot W^2} + \frac{1}{\left(c_L - \frac{1}{\frac{1}{c_s} - \frac{R}{W}} \right)^2}}}$$

Es hat sich gezeigt, dass sich die Standardabweichung durch diese Korrektur um 0,04% verschlechtert hat. Die Korrektur spielt nur in den ersten paar Sekunden eine Rolle, in diesem Bereich sind die berechneten Werte aber ohnehin mit Vorsicht zu betrachten, da sich dort erst der Druck aufbaut. Da sich die Annahme, dass die Korrektur des Starttrockengehaltes vernachlässigbar ist, bestätigt hat wurden bei den Auswertungen immer die Messwerte der Sekunde 1 als Starttrockengehalt eingesetzt

Eine schrittweise Berechnung ist nur möglich, wenn der Eingangstrockengehalt um den Rückbefeuchtungsterm korrigiert wird.

4.5 Messreihenreduzierung

Das Modell mit Druckexponent und Rückbefeuchtungsterm ergab die besten Ergebnisse. Im Diagramm 4-24 und Diagramm 4-25 ist auch zu erkennen, dass einige Parameter stoffabhängig sind.

Bisher wurden immer 6 verschiedene Grammatoren bei den Drücken 3, 6 und 9 MPa gemessen. Um den Messaufwand zu reduzieren soll nun versucht werden mit weniger Messungen ähnlich gute Ergebnisse zu erreichen.

Für die Ermittlung des Massenexponenten und des Rückbefeuchtungsterms sind mindestens 2 Grammatoren notwendig, für die Bestimmung des Druckexponenten werden ebenfalls mindestens 2 Drücke benötigt. Somit sollten 3 Messungen für die Parameteridentifikation ausreichen.

Es ist aber zu erwarten, dass mehr als 2 Flächenmassen benötigt werden, um Massenabhängigkeit und Rückbefeuchtung zu bestimmen.

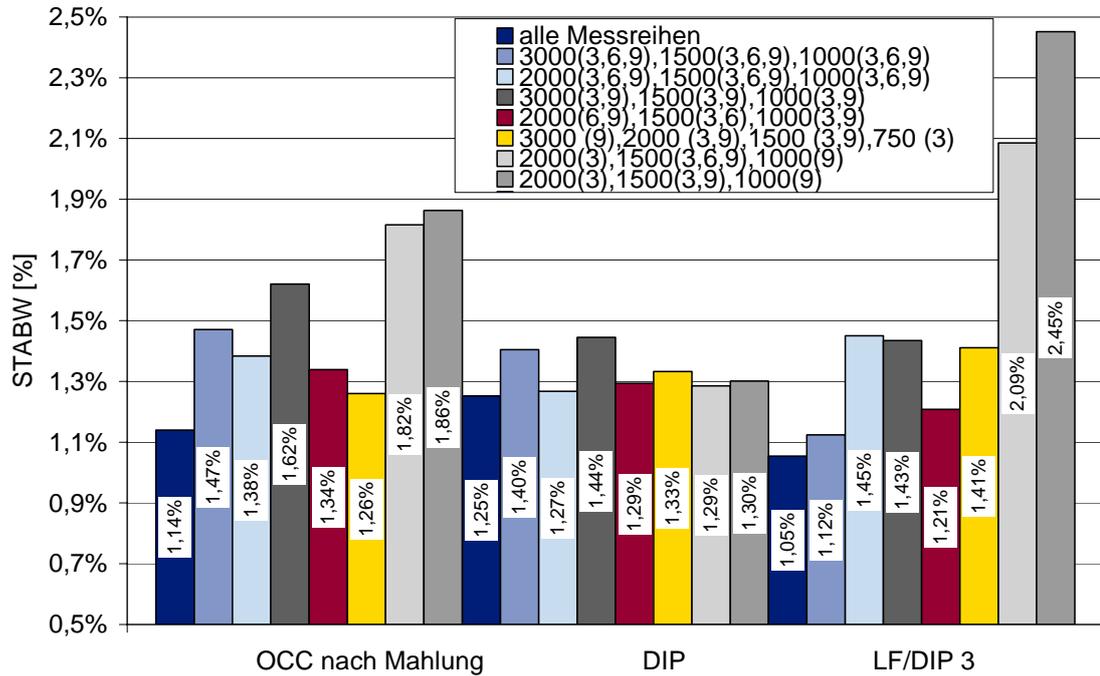


Diagramm 4-27: Möglichkeiten zur Messreihenreduzierung am Beispiel der Stoffe DIP, OCC n. M. und „LF/DIP 3“

Um dies zu testen, werden für 3 Stoffe verschiedene Möglichkeiten ausprobiert. Im Diagramm 4-27 sind die Standardabweichungen die mit der jeweiligen Anzahl und Möglichkeit der Messreihenwahl erreicht werden, dargestellt. In der Legende stehen vor den Klammern die flächenbezogenen Massen und in der Klammer die Drücke. Die Berechnung der Standardabweichung wurde mit den gesamten Messdaten durchgeführt, um vergleichbare Werte zu erhalten. Bei den Stoffen OCC nach Mahlung und „LF/DIP 3“ steigt die Standardabweichung stark an, wenn nur 4 bzw. 5 Messreihen für die Parametersuche verwendet werden. Der DIP Stoff liefert schlechtere Ergebnisse wenn die 3000 g/m² miteinbezogen werden. Aufgrund dieser Ergebnisse sollte entweder die Möglichkeit 2000(6,9), 1500(3,6), 1000(3,9), in rot dargestellt, oder 3000(9), 2000(3,9), 1500(3,9), 750(3) in gelb dargestellt, verwendet werden. Um eine Entscheidung zu treffen werden alle bis jetzt gemessenen Stoffe mit diesen zwei Möglichkeiten ausgewertet und die Standardabweichungen verglichen. Die Ergebnisse sind in Diagramm 4-28 dargestellt.

Da beide Möglichkeiten im Durchschnitt die gleiche Abweichung zeigen, ist die Wahl der Messreihenreduzierung auf die Methode mit 4 Grammatoren gefallen, da so eine höhere Abdeckung der Flächenmassen erreicht wird.

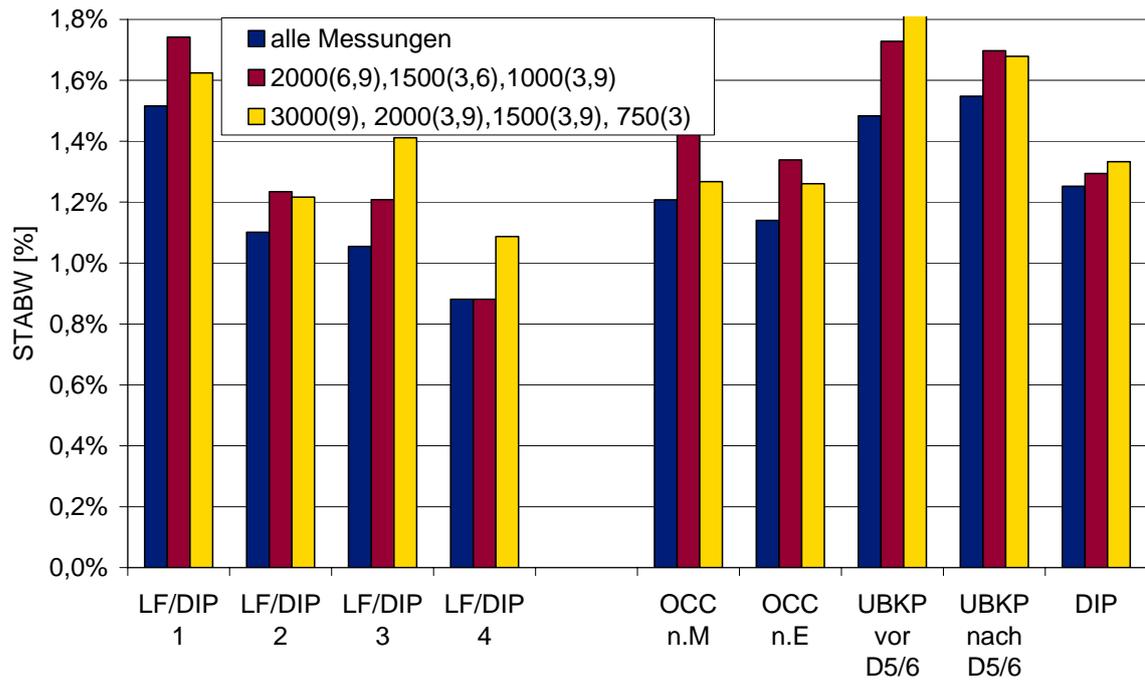


Diagramm 4-28: Vergleich zweier Möglichkeiten der Messreihenreduzierung anhand der bisher gemessenen Stoffe

5 Vergleich der verschiedene Rohstoffe und Anwendung des Modells

5.1 Verschiedene Rohstoffe im Vergleich

Nachdem im vorherigen Kapitel meistens nur eine kleine Auswahl an Stoffen verwendet wurde, und das Hauptaugenmerk auf der Parametersuche lag, werden nun die 13 gemessenen Faserstoffe miteinander verglichen. So können die Unterschiede in ihren Entwässerungseigenschaften festgestellt werden.

Das Diagramm 5-1 zeigt die Trockengehaltsverläufe aller gemessenen Stoffe bei 1000 g/m² und 6 MPa. Da die Stoffe: UBKP 2, BKP und „LF Sulfat“ (getrocknet) nur mit dem reduzierten Messreihensatz gemessen wurden, gibt es für 6 MPa keine Messdaten. Von den drei Stoffen existieren für diesen Fall nur Modellkurven. Sie sind daher als durchgezogene Linie dargestellt.

In dieser Darstellung ist klar der Vorteil der FiberXPress zu erkennen. Denn Stoffe, die denselben Endtrockengehalt erreichen, verhalten sich bei kürzerer Pressdauer sehr unterschiedlich. Sehr gut ersichtlich ist auch der Einfluss der Mahlung auf die Entwässerung anhand der Stoffe „LF/DIP 1“-, „LF/DIP 5“ (graue Symbole). Auch bei den Unbleached Kraft Pulp Stoffen: „UBKP v. D5/6“ und „UBKP n. D5/6“, ist zu sehen, dass mit steigendem Mahlgrad die Entwässerung langsamer verläuft. Bei diesen zwei Beispielen ist anhand der Tabelle 5-1 (Seite 69) auch zu erkennen, dass das Wasserrückhaltevermögen mit schlechter werdender Entwässerung steigt.

Vergleicht man aber beispielsweise die Stoffe BKP und „LF/DIP 2“, die dasselbe WRV besitzen, so ist der Trockengehaltsverlauf der beiden Stoffe doch deutlich unterscheidbar.

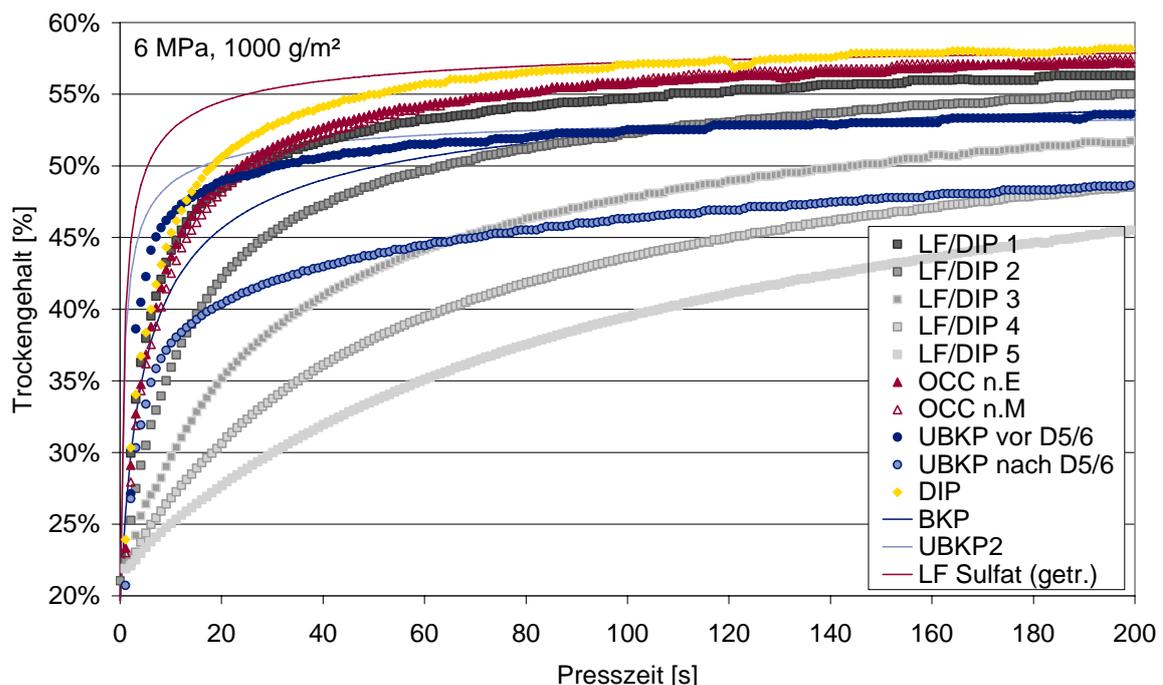


Diagramm 5-1: Trockengehaltsverläufe aller gemessenen Stoffe bei 1000 g/m² und 6MPa

5.1.1 Pressdauer

Vergleicht man nun den Trockengehalt nach 10 Sekunden mit dem nach 200 Sekunden (siehe Diagramm 5-2), so fällt auf, dass je nach Rohstoff die Sprünge größer oder kleiner sind. Tendenziell ist der Unterschied bei den UBKP-Stoffen geringer, sie entwässern sehr schnell und haben schon nach 10 Sekunden einen relativ hohen Trockengehalt. Dies hängt auch mit dem niedrigen Schopper-Riegler Wert dieser Faserstoffe zusammen. Bei den OCC, DIP und LF/DIP wirkt sich die verlängerte Presszeit deutlich stärker aus. Wenn die Maschinengeschwindigkeit bei allen Rohstoffen gleich wäre, bräuchten die Stoffe OCC, DIP und LF/DIP Pressen die höhere Verweilzeiten gewährleisten. Beispielsweise Schuhpressen mit sehr langer Schuhlänge. Für die Stoffe UBKP 2, „LF Sulfat“ „UBKP v. D5/6“ kann bei gleicher Geschwindigkeit die Schuhlänge verkürzt werden. Interessant ist auch der Vergleich zwischen den Stoffen UBKP 2 und „UBKP v. D5/6“. Der Unterschied zwischen den Trockengehalten nach 200 s ist vernachlässigbar klein (0,3%), nach 10 Sekunden beträgt die Differenz aber noch 2,2%. Der anfängliche Vorteil des UBKP 2 kann durch eine Verweilzeitverlängerung nicht weiter ausgenutzt werden.

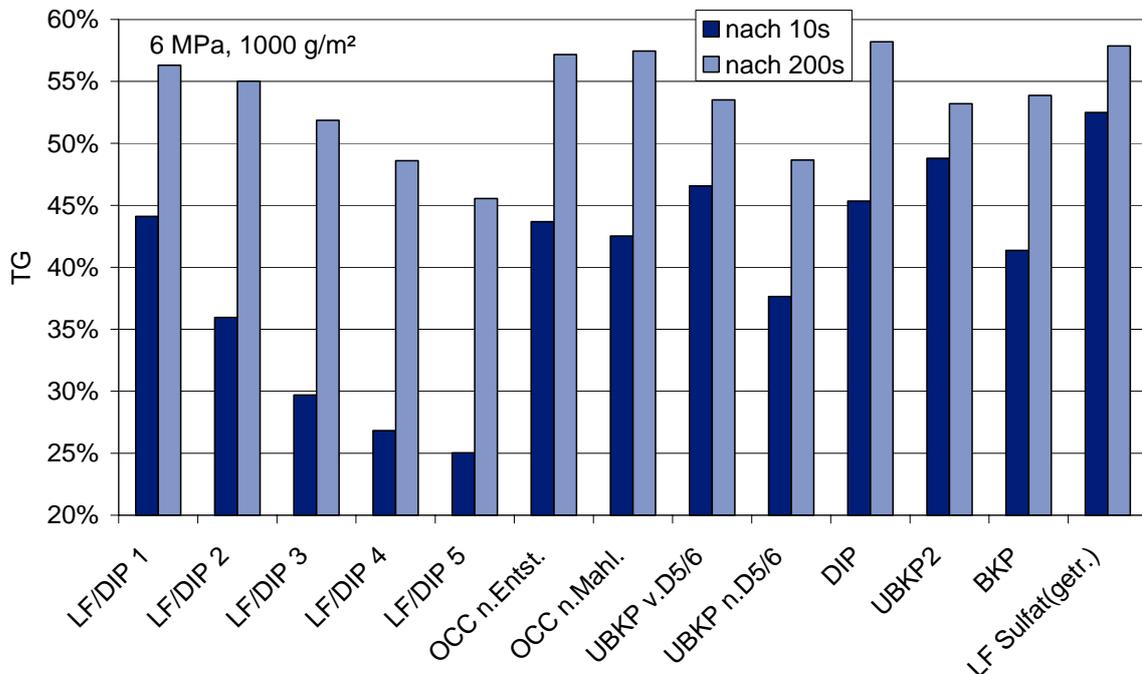


Diagramm 5-2: Vergleich der Trockengehalte nach 10 bzw. 200s; Werte bei 1000 g/m² und 6MPa

5.1.2 Entwässerungsarten (flow vs. pressure controlled)

In Diagramm 5-3 ist der Trockengehalt nach 100 Sekunden über der Grammaturn aufgetragen. Dies ist eine Möglichkeit die Grammaturnabhängigkeit darzustellen. Weiters, lässt sich gut erkennen, welche Stoffe noch im „flow-controlled“ Bereich sind. Die Entwässerung der Stoffe „LF/DIP 4“ und „LF/DIP 2“ ist über dem ganzen Grammaturnbereich vom hydraulischen Druck bestimmt. Der Strömungswiderstand in der Papierbahn ist der limitierende Faktor. Eine Verweilzeitverlängerung bringt in diesem Bereich eine höhere Entwässerung. Anders sieht das für den „LF/DIP 1“ aus, der einen niedrigeren Mahlgrad und WRV besitzt. Unterhalb von etwa 1500 g/m² wird die Kurve

flacher und der Strukturdruck fängt an zur bestimmenden Komponente zu werden. Hier muss der Kompressionsdruck erhöht werden, um noch mehr Wasser auszupressen. Relativ ähnlich ist der Verlauf der Stoffe „OCC n. Entstipper“ und des DIP. Der Verlauf der Kurve des „UBKP v. D5/6“ ist dagegen wieder etwas auffälliger. Über den gesamten Grammaturbereich ist kein Ansteigen des Trockengehalts zu erkennen. Dies bedeutet, dass auch schon bei sehr hohen flächenbezogenen Massen der Strukturdruck zu tragen kommt. Ganz anders verhält sich dieser Stoff nachdem er den Doppelscheibenrefiner 5/6 passiert hat. Der „flow-controlled“ Bereich ist deutlich ausgeprägt. Das Abfallen des 750 g/m² Punktes liegt an den Rückbefeuchtungseffekten.

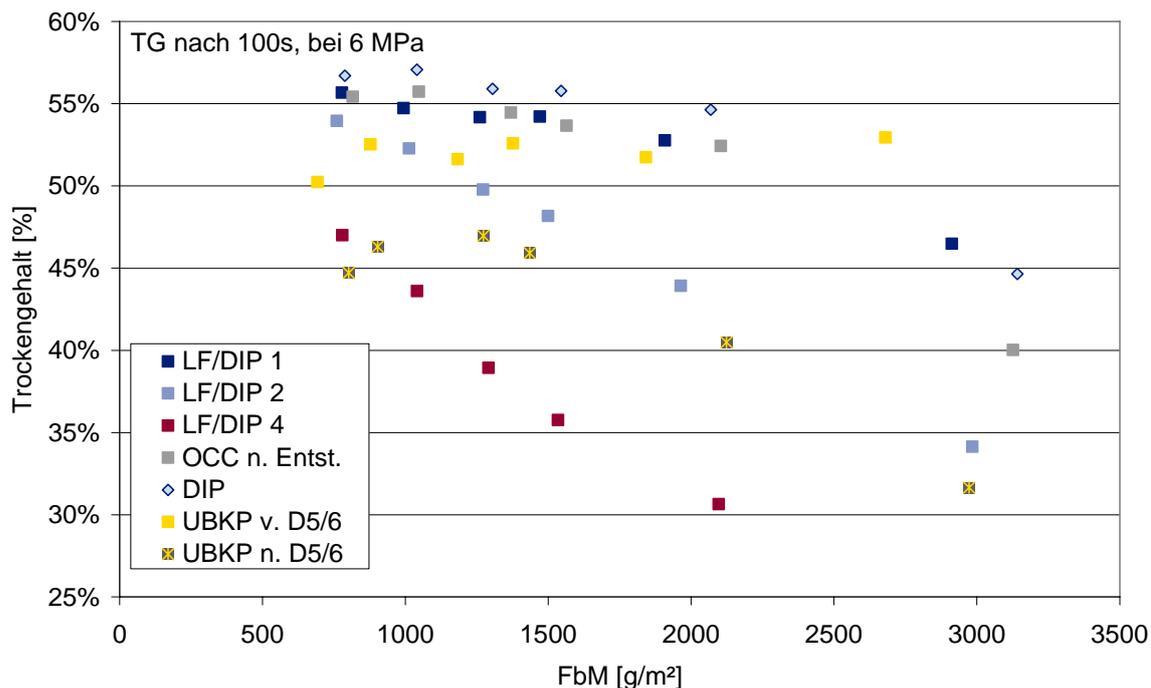


Diagramm 5-3: Darstellung des TG nach 100s über der Grammatatur

5.1.3 Grammataturabhängigkeit

Um nochmals auf die Grammataturabhängigkeit einzugehen, ist in Diagramm 5-4 die Zeit um einen Trockengehalt von 35% zu erreichen über der flächenbezogenen Masse aufgetragen. Die potenziellen Trendlinien der Stoffe sind sehr verschieden, und auch der Exponent in der dazugehörigen Gleichung variiert stark. Besonders deutlich wird das beim Vergleich der zwei UBKP Stoffe. Beim Rohstoff „UBKP vor D5/6“ lässt sich nur schwer eine Aussage über die Grammataturabhängigkeit treffen, da die Entwässerung sehr schnell verläuft. Im dargestellten Bereich sieht es so aus, als würde keine Abhängigkeit bezüglich der Flächenmasse bestehen. Im Gegensatz dazu steigt die Presszeit mit steigender Grammatatur beim Stoff „UBKP nach D5/6“ deutlich.

Anders sieht das bei den Stoffen DIP und „OCC n. Entstipper“ aus. Die Kurven sind in etwa gleich. Dass sich diese Rohstoffe ähnlich verhalten, zeigte sich auch schon in den vorherigen Diagrammen.

Vergleicht man die Vorfaktoren von „LF/DIP 2“ und 3 miteinander, so ist der Vorfaktor vom Stoff mit höherem Mahlgrad (LF/DIP 3) größer. Nachdem dieser Wert der Presszeit

für 1 g/m² entspricht macht es Sinn, dass mit steigendem Mahlgrad mehr Zeit benötigt wird. Wie in Kapitel 4.1 festgestellt wurde, sind der Vorfaktor und der Exponent voneinander abhängig. Es gibt viele Kombinationsmöglichkeiten der beiden Faktoren, ist aber einer der beiden bestimmt, ändert sich der zweite kaum. Aus diesem Grund ist der Unterschied im Exponenten der beiden LF/DIP vernachlässigbar und als ähnlich zu bewerten.

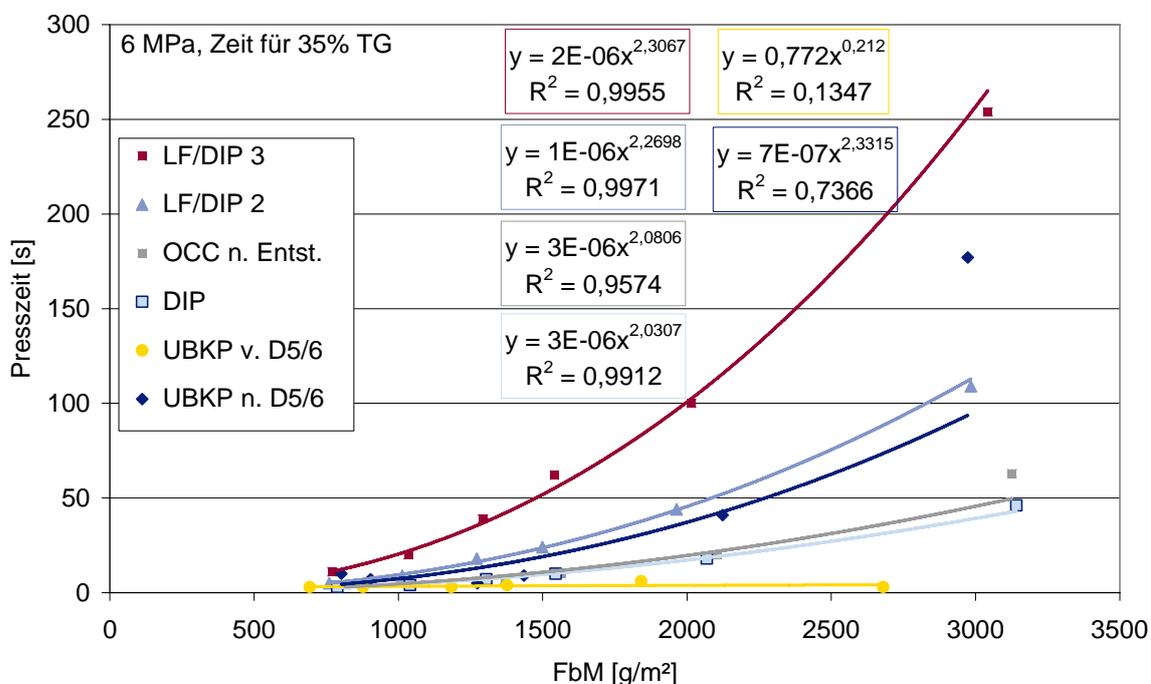


Diagramm 5-4: Grammaturnabhängigkeit einiger Stoffe im Vergleich; bei 6 MPa für 35% TG

Der Grund für das unterschiedliche Verhalten der UBKP Stoffe ist auch in Diagramm 5-3 gut zu erkennen. Bei dem Stoff „UBKP vor D5/6“ erreichen alle flächenbezogenen Massen in etwa denselben Trockengehalt. Nach dem Doppelscheibenrefiner 5/6 weichen die 2000 und 3000 g/m² Punkte stark von den anderen ab, sie benötigen mehr Zeit für die Entwässerung. Erst ab 1500 g/m² sind die Trockengehalte nach 100 Sekunden Presszeit wieder ähnlich.

5.1.4 Verhalten bei Druckerhöhung

Interessant ist auch die Reaktion auf Druckerhöhung eines Rohstoffes. Sie unterscheidet sich bei den gemessenen Stoffen erheblich. In Diagramm 5-5 sind von den drei Druckstufen (3, 6 und 9 MPa) die Trockengehaltskurven über dem Pressimpuls aufgetragen. Für den Vergleich wurden vier Stoffe und eine flächenbezogene Masse von 1000 g/m² ausgewählt.

DIP und OCC verhalten sich wieder sehr ähnlich. Zu Beginn sind 3 MPa am wirksamsten, später, ab etwa 150 MPa s, überholt die 6 MPa Kurve. Die 9 MPa überholen beim DIP etwas später als bei OCC. Es zeigt sich, dass ein höherer Pressdruck für das Erreichen höchster Trockengehalte notwendig ist. Das zu Beginn ein hoher Druck von Nachteil ist,

kann durch ein Zusammenpressen der Zwischenräume und somit einer geringeren Permeabilität erklärt werden.

Der „UBKP n. D5/6“ spricht ebenfalls auf höhere Drücke an. Der Verlauf der 3 und 6 MPa Kurven ist identisch. Nur bis etwa 50 MPa s sind die niedrigen Drücke von Vorteil, dann ist der hohe Druck etwas besser für die Entwässerung.

Ganz anders ist das Ansprechverhalten auf Druck bei dem „LF/DIP 3“. Dieser Stoff entwässert deutlich langsamer und somit ist der Bereich in dem kleine Drücke von Vorteil sind ausgedehnter als bei den anderen beiden Stoffen.. Bei einer Verlängerung der 3 MPa Kurve würde diese erst ab circa 1000 MPa s die nächst höhere schneiden.

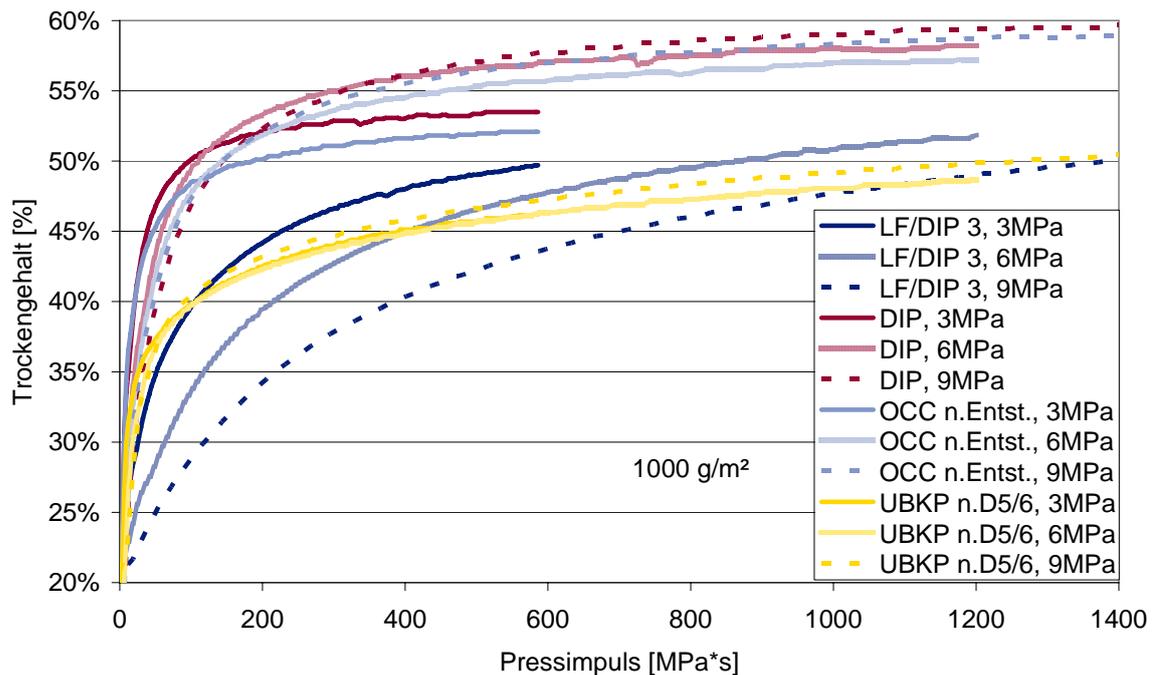


Diagramm 5-5: TG-Verläufe vier verschiedener Stoffe bei den Drücken 3,6 und 9MPa; FbM: 1000 g/m²

5.1.5 Literaturvergleich

Mit einem Literaturvergleich soll überprüft werden, ob die gemessenen FiberXPress Daten ähnliche Ergebnisse liefern wie Stoffe die schon früher in anderen Arbeiten untersucht wurden. Es stellte sich heraus, dass meistens ein ungebleichter Kraftzellstoff in den Experimenten verwendet wurde. Natürlich unterscheidet sich dieser von dem hier verwendeten, zum groben Vergleich sollte es aber ausreichend sein.

5.1.5.1 Unbleached Kraft Pulp

G.V.LAIVINS UND A.M.SCALLAN [10]

Für die Pressversuche wurde ein ungebleichter Kraftzellstoff verwendet. Das Experiment wurde durchgeführt, um festzustellen, wieviel Wasser aus den Faserzwischenräumen bzw. aus den Fasern selbst ausgepresst wird. Dazu wird dem feuchten Stoff eine Polymerlösung beigemischt, deren molekularer Durchmesser größer als die größte Porenöffnung der Faser ist. Kommt beim Pressvorgang das Wasser aus den Faserzwischenräumen, so wird die Polymerlösung verdünnt. Die verwendete Füllmenge ist auf 4g otro berechnet worden [10].

Die Apparatur für die Pressversuche ist ähnlich der FiberXPress. Die 4g otro entsprechen den 2000 g/m². Aus den Daten von G.V.LAIVINS UND A.M.SCALLAN kann der erreichte Trockengehalt bei einem bestimmten Druck berechnet werden. In der Abbildung 5-1 sind die Messdaten aus der Literatur durch Kreise dargestellt, die Trockengehalte die mit der FiberXPress gemessen wurden mit blauen Rechtecken. Es ist zu erkennen, dass es eine gute Übereinstimmung bei 3 und 6 MPa gibt, der Trockengehalt der bei 9 MPa erreicht wird ist etwas zu niedrig.

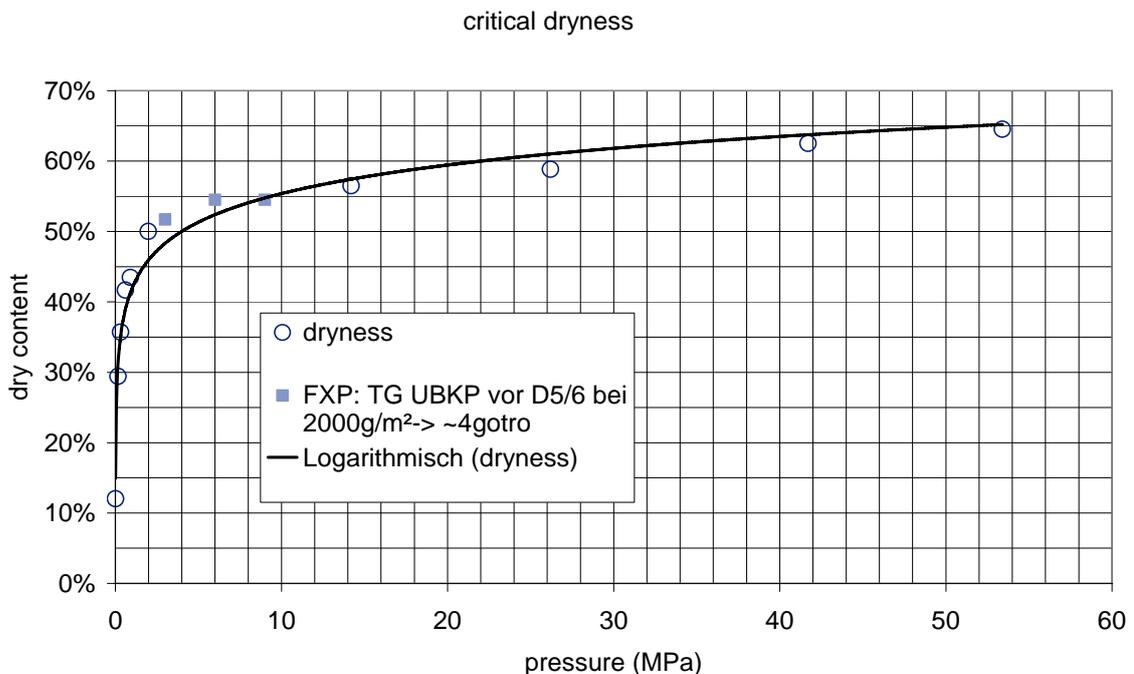


Abbildung 5-1: Pressversuche mit UBKP [20] (G.V.Laivins und A.M.Scallan) und die Daten der FXP

YOUNG, CAULFIELD, WEGNER [17,18]

In ihren Arbeiten stellten sie das Viskoelastische Modell, auch bekannt als Kelvin Modell, vor. Bei den Versuchen wurde unter anderem der Fließwiderstand mit einer Permeabilitätszelle gemessen. Sie benutzen dafür einen ungebleichten Zellstoff aus amerikanischer Terpentinkiefer mit einem CSF Wert von 650, was ungefähr einem SR von 18 entspricht. Im Diagramm 5-6 sind die Messpunkte der Literatur in blau dargestellt. Es wurde der Fließwiderstand von Handsheet- und Machine-made-webs gemessen. Dass die Handsheet-webs einen höheren Widerstand leisten, wurde mit der schlechteren Formation der Machine-made-webs erklärt. Der aufgebrachte Druck in der Permeabilitätszelle entspricht einem Strukturwiderstand und somit stellt sich ein vom Druck abhängiger Trockengehalt ein. Der verwendete Druck im Experiment ist leider nicht bekannt. Um die FXP Daten zu vergleichen, wurden die Fließwiderstände bei unterschiedlichen Trockengehalten berechnet. Der Grund der wenigen FXP Punkte ist dadurch begründet, dass nicht alle Grammaturen 45% TG erreicht haben. Das starke Ansteigen des Fließwiderstandes im Bereich zwischen 2,1 und 2,6 ist bei sehr hohen flächenbezogenen Massen nicht mehr zu erkennen. In der Arbeit von YOUNG, CAULFIELD, WEGNER [17,18]

wurde auch noch ein abfallender Fließwiderstand mit sinkendem SR Wert festgestellt. Dies lässt sich auch bei den FiberXPress Daten beobachten.

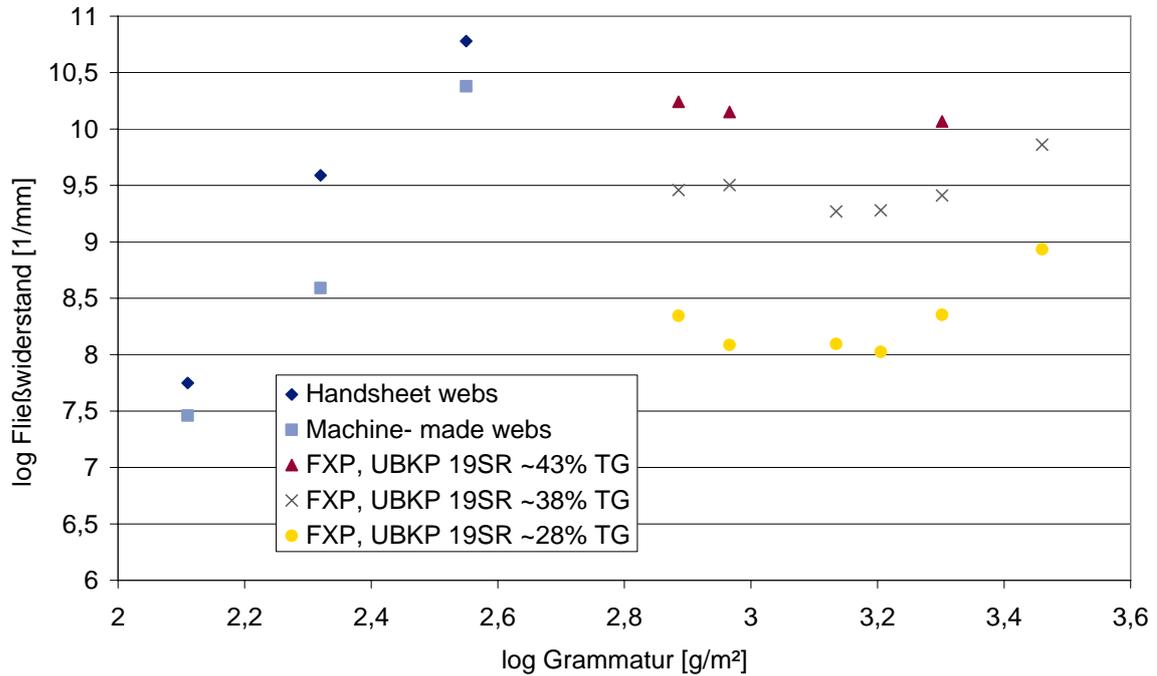


Diagramm 5-6: Vergleich der Fließwiderstände von Young, Caulfield, Wegner und der FXP

5.2 Auswertung der ermittelten Parameter

In diesem Kapitel werden die ermittelten Parameter miteinander verglichen und den Laborwerten Schopper-Riegler und Wasserrückhaltevermögen gegenübergestellt.

Die Parameter und Stoffwerte sind in Tabelle 5-1 zu finden.

Wendet man das Modell nach Formel (18) mit Berücksichtigung der Rückbefeuchtung auf verschiedene Rohstoffe an, so erhält man folgende Parameter:

Tabelle 5-1: Parameter der verschiedenen Stoffe

Stoffbezeichnung	SR	WRV [%]	$k \cdot 10^{-9} [\text{kg}^2/\text{m}^4]$	c_L [%]	m	d	R [kg/m²]
LF/DIP							
1	29	126,9	14,765	53,88	2,450	0,156	0,305
2	46	142,7	2,124	55,59	2,284	0,165	0,223
3	65	163,0	0,742	60,23	2,415	0,156	0,283
4	70	178,9	0,469	52,32	2,380	0,213	0,156
5							
OCC							
nach Entstipper	47	113,3	12,150	54,57	3,124	0,173	0,292
nach Mahlung	57	122,1	5,117	58,64	2,864	0,176	0,384
UBKP							
vor D5/6	13	154,8	34,549	50,29	0,000	0,096	0,226
nach D5/6	19	186,6	40,316	48,09	4,280	0,129	0,353
DIP	61	119,3	8,137	59,47	2,641	0,166	0,409
UBKP 2	16	141,2	111,235	45,89	1,997	0,149	0,167
BKP	34	142,4	11,918	53,60	1,870	0,088	0,133
LF Sulfat	14	93,3	74,840	52,18	0,152	0,125	0,151

Alle Parameter sind mit dem reduzierten Messreihen ermittelt worden.

Für den Stoff „LF/DIP 5“ konnte diese Art der Parametersuche nicht durchgeführt werden, da die Grammatoren 3000 g/m² und 2000 g/m² nicht gemessen wurden.

Der Parameter k entspricht ungefähr der Permeabilität. In Kapitel 4.3.1.1 wurde darauf näher eingegangen. Auch später zeigten sich immer wieder Parallelen zwischen Durchlässigkeit und dem Parameter k .

c_L , der Grenzrockengehalt, gibt an welcher Trockengehalt beim Pressen erreicht werden kann, wenn ein Druck von 1 MPa aufgebracht wird. Die Skalierung auf 1 MPa kommt durch die Einführung des Druckexponenten.

Der Druckexponent d beschreibt wie stark sich der Grenzrockengehalt in Abhängigkeit zum aufgebrauchten Druck ändert.

Der Exponent über der Grammatoren, der Massenexponent m , beschreibt den Einfluss der flächenbezogenen Masse auf den Trockengehalt. Dieser Exponent wird für gewöhnlich mit dem Wert 2 belegt. Dies kommt aus dem Gesetz von Darcy.

Die Rückbefeuchtungseffekte werden mit dem Term R beschrieben. In Tabelle 5-1 ist zu erkennen, dass die Werte für R im Vergleich zur Literatur sehr groß sind.

Der Rückbefeuchtungsterm an Papiermaschinen liegt üblicherweise im Bereich zwischen 5 und 60 g/m² [23].

Bei den Messungen mit FiberXPress erhält man ein R von durchschnittlich 250 g/m². Dies lässt sich durch das offene System (einsaugen des Restwassers durch die Kanüle) erklären. Auch das nicht Vorhandensein eines Filzes trägt zu einer erhöhten Rückbefeuchtung bei.

5.2.1 Massenexponent

Die Grammatorenabhängigkeit eines Rohstoffes wird über den Massenexponenten beschrieben. Im Grundmodell von CLOS ET AL. [20,21] (Formel (6)) ist der Exponent der flächenbezogenen Masse 2. Dies kommt von der Herleitung der Formel aus dem Gesetz von Darcy und der Annahme des Fließweges durch das Pellet. In Diagramm 5-7 ist der Massenexponent über dem Wasserrückhaltevermögen dargestellt. Die Rohstoffe besitzen durchwegs einen höheren Exponenten als 2, dies spricht für einen stärkeren Einfluss der Grammatoren auf den Trockengehalt. Bei den Stoffen LF/DIP ist sehr schön der in etwa konstante Verlauf über den gesamten Mahlgradbereich zu sehen. Dies lässt darauf schließen, dass dieser Parameter ein stoffspezifischer Wert ist, der von der Mahlung unbeeinflusst ist. Auch der Massenexponent der beiden OCC-Stoffe (nach Entstipper und nach Mahlung) liegt etwa im selben Bereich. Etwas unerwartet sind die Daten der Stoffe „LF Sulfat“ (getrocknet) und „UBKP vor D5/6“. Sie haben keinen bzw. so gut wie keinen Massenexponenten. Eine mögliche Ursache für dieses Problem ist die extrem schnelle Entwässerung dieser Stoffe. Beim „LF Sulfat“ beispielsweise, steigt der Trockengehalt innerhalb von 3 Sekunden auf rund 43%. Und nach ~15 Sekunden überholt die schwerere flächenbezogene Masse die leichtere im Trockengehalt. Auch bei dem Versuch nur die ersten 20 Sekunden mit dem Solver auszuwerten, steigt der Massenexponent auf nur 0,35. Dafür steigt aber k stark an und die Rückbefeuchtung wird um ein Vielfaches kleiner. Die

veränderten Parameter $k \sim 210$, $c_L \sim 46\%$ würden sogar besser im Trend des Diagramm 5-9 liegen (durch Pfeil symbolisiert). Dieselben Versuche mit dem „UBKP vor D5/6“ machen wenig Sinn, der Massenexponent wäre dann 0,02, $c_L \sim 37\%$, $R=0$ und k nahezu unverändert. Es hat den Anschein, dass bei einer sehr schnellen Entwässerung die Parametersuche schwierig ist. Vor allem der Massenexponent kann nicht mehr richtig ermittelt werden, wenn die Trockengehaltskurven sehr dicht beieinander liegen, und sich schon nach den ersten 20 Sekunden die Rückbefeuchtungseffekte bemerkbar machen. Ein weiteres Problem der schnellen Entwässerung ist, dass der eingestellte Druck noch nicht erreicht ist, da der Druckregler einige Sekunden benötigt, um sich einzuschwingen. Es ist auch noch zu erwähnen, dass die SR-Werte dieser Stoffe sehr niedrig sind und der Stoff üblicherweise stärker aufgemahlen wird, bevor er zum Einsatz kommt.

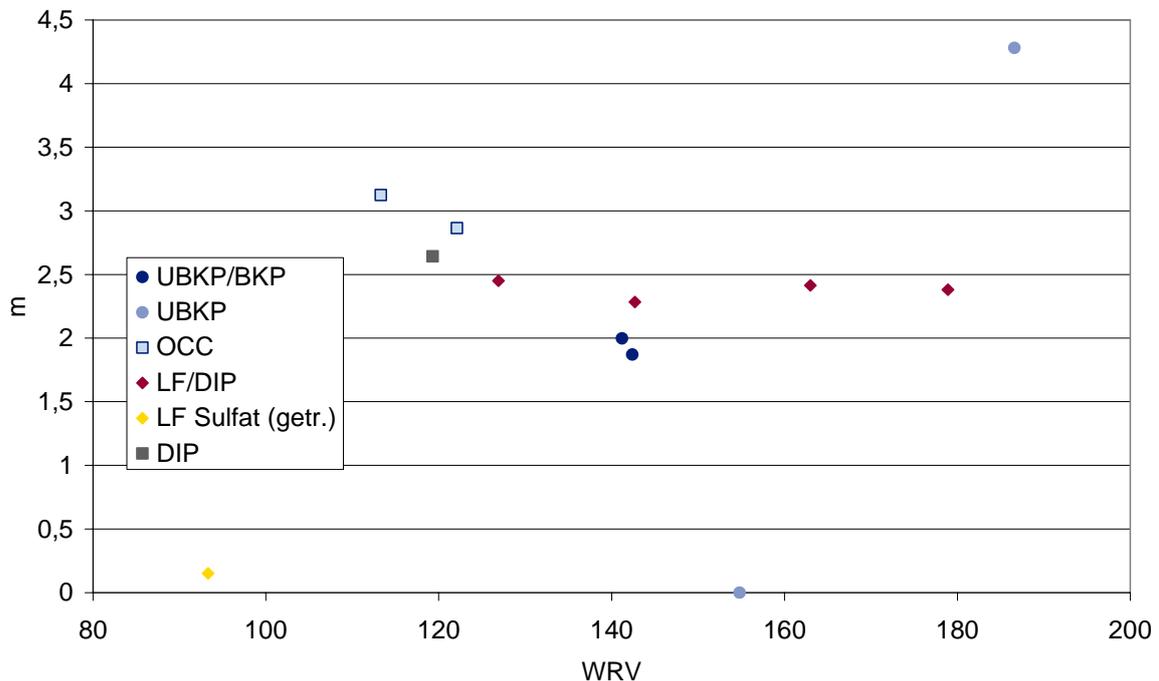


Diagramm 5-7: Massenexponent der Stoffe über ihr WRV aufgetragen

5.2.2 Parameter k

Diagramm 5-8 stellt den Verlauf des Parameters k aller Stoffe über ihrem Schopper-Riegler Wert dar. In Kapitel 4.3.1.1 wurde festgestellt, dass der Parameter k eng mit der Permeabilität zusammenhängt. Wenn man nun davon ausgeht, dass dieser Parameter der Permeabilität entspricht, macht es Sinn, dass mit steigendem SR-Wert der Parameter k sinkt. Mit steigendem Mahlgrad werden die Fasern verkürzt, fibrilliert und flexibilisiert. Somit bildet sich ein dichteres Netzwerk aus, und die Durchlässigkeit für Wasser wird geringer.

Die Stoffe DIP und OCC weichen etwas vom allgemeinen Trend ab. Eine Möglichkeit zur Erklärung wäre der enthaltene Füllstoff und, dass die beiden Stoffe ausschließlich aus Recyclingfasern bestehen. Wiederaufbereitete Fasern sind schon zu einem großen Teil verhornt, haben keine Fibrillen mehr an der Faserwand und sind steif. Diese „toten“ Fasern haben nicht mehr die Neigung stark zu quellen, das ist auch im Wasserrückhaltevermögen

ersichtlich. Diese Kombination aus steifen, nicht stark gequollenen Fasern könnte die Permeabilität erhöhen, und somit die Abweichung vom Trend erklären.

Der Pfeil deutet die Veränderung des Parameters k durch die Messdatenreduzierung auf 20 Punkte pro Messreihe an. Der veränderte Parameter fügt sich fast noch besser in den Trend ein.

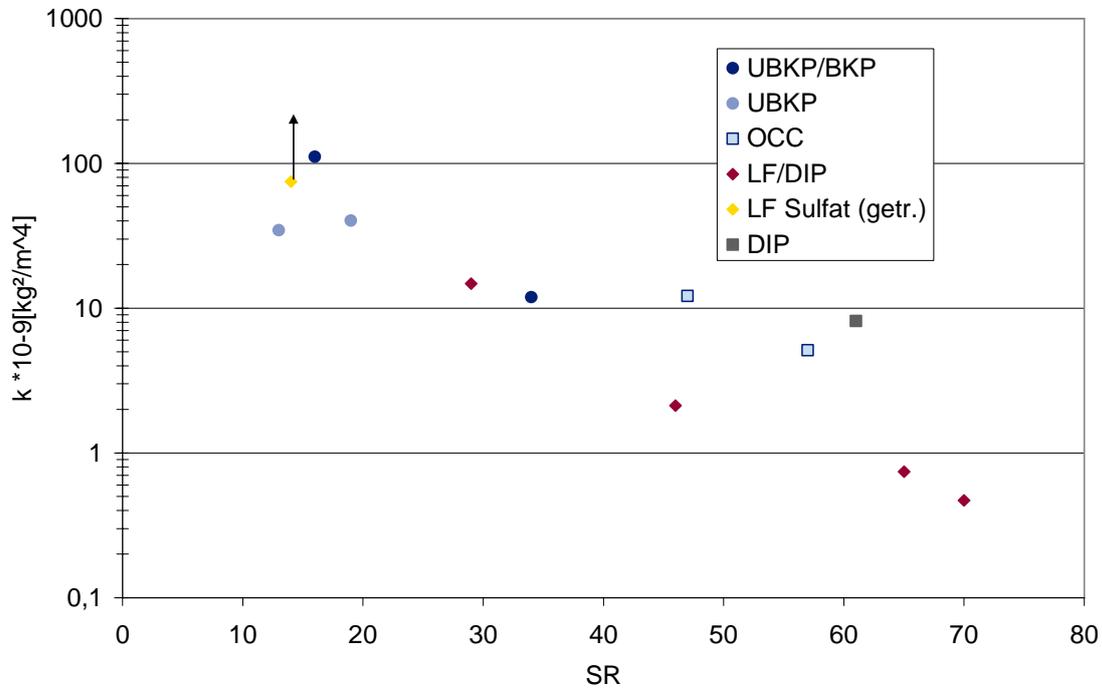


Diagramm 5-8: Parameter k über SR der gemessenen Stoffe

5.2.3 Abhängigkeit der Parameter untereinander

Die Abhängigkeit der Parameter untereinander wird in Diagramm 5-9 dargestellt.

Auf der x-Achse ist der Grenzrockengehalt aufgetragen, auf der rechten y-Achse der Parameter k in logarithmischer Skalierung und auf der linken y-Achse die übrigen Parameter m , d und R . Die Rückbefeuchtung sowie Massen- und Druckexponent zeigen keine Abhängigkeit zum Grenzrockengehalt. Anders ist dies beim Parameter k , der mit steigendem c_L immer größer wird.

Dass der Stoff „LF/DIP 4“ so stark vom Trend abweicht erscheint ungewöhnlich. Betrachtet man die Parameter in Tabelle 5-1 ist auch hier zu erkennen, dass ein Grenzrockengehalt von ~ 52% nicht in die Reihe passt. Darum wurde versucht stattdessen für c_L einen fixen Wert von 62% einzusetzen und die restlichen Parameter vom Solver suchen zu lassen. Es zeigte sich, dass trotz einer Veränderung des Grenzrockengehalts um 10% der Solver andere Parameter findet, die die Standardabweichung um nur 0,1% erhöhen. Der Parameter k wird um die Hälfte kleiner ($\sim 0,23 \cdot 10^{-9}$), m steigt um 0,2, d um 0,03 und R steigt auf 0,376 kg/m². Dieses Ergebnis spricht dafür, dass das Parametersystem überbestimmt ist und die Parameter c_L und k stark voneinander abhängen. Der Punkt des Stoffes „LF Sulfat“ weicht ebenfalls etwas ab. Wenn der Wert des Parameters k durch die Messdatenreduzierung auf 20 Messpunkte auf die Trendlinie korrigiert wird, sind wie im Diagramm 5-8 nur noch die Stoffe, die aus Recyclingfasern bestehen abweichend.

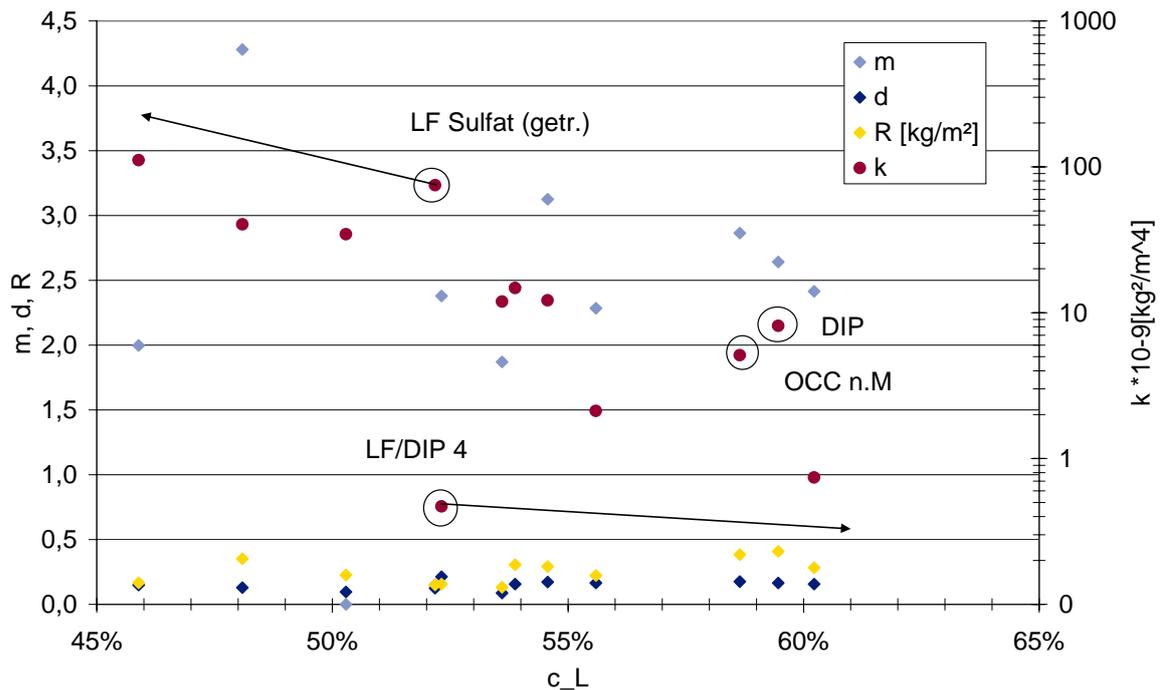


Diagramm 5-9: Abhängigkeit der Parameter m, d, R und k vom Grenzrockengehalt

5.2.4 Anwendung auf ein reales Pressenkonzept

Die Anwendung auf ein reales Pressenkonzept ist eine Möglichkeit die Parameter auf ihre Plausibilität unter realen Bedingungen zu prüfen. Dafür werden die Betriebsdaten einer Single-Nip Schuhpresse herangezogen. Für jeden Stoff sind die Startbedingungen bzw. die Betriebsparameter gleich.

- TG_{in}=20%
- FbM=60 g/m²
- LL=1400 kN/m
- w_{PM}=1000 m/min
- T=50 °C
- Filzanzahl=1

Grammatur und Maschinengeschwindigkeit liegen zwischen den Daten der leichten Sorten (LF/DIP, DIP) und denen der schweren (UBKP, OCC). In diesem Versuch soll nur festgestellt werden, ob die ermittelten Parameter, die aus Messungen mit der FiberXPress ermittelt worden sind, auf annähernd reale Bedingungen übertragbar sind.

Der Pressimpuls ergibt sich laut Formel (1) aus Linienlast und Maschinengeschwindigkeit, er beträgt in diesem Fall 84 kPa s. Um die Druckabhängigkeit zu beobachten, werden einmal 8 MPa und einmal 3 MPa als Maximaldruck eingesetzt. Bei einer Linienlast von 1400 kN/m entspricht ein Maximaldruck von 8 MPa einer ungefähren Schuhlänge von 300 mm. Bei selber Linienlast und einem Maximaldruck von 3 MPa wird eine fiktive Schuhlänge von ~700 mm erreicht.

In der Literatur liegen die Rückbefeuchtungsterme zwischen 5 und 60 g/m². Da die Werte von R , die anhand der FiberXPress Messungen ermittelt wurden, aber im Bereich von 250 g/m² sind, werden sie für die Berechnung von realen Grammaturen und Impulsen durch 10 dividiert.

Die Ergebnisse, die Parameter auf ein reales Pressenkonzept anzuwenden, sind in Diagramm 5-10 dargestellt.

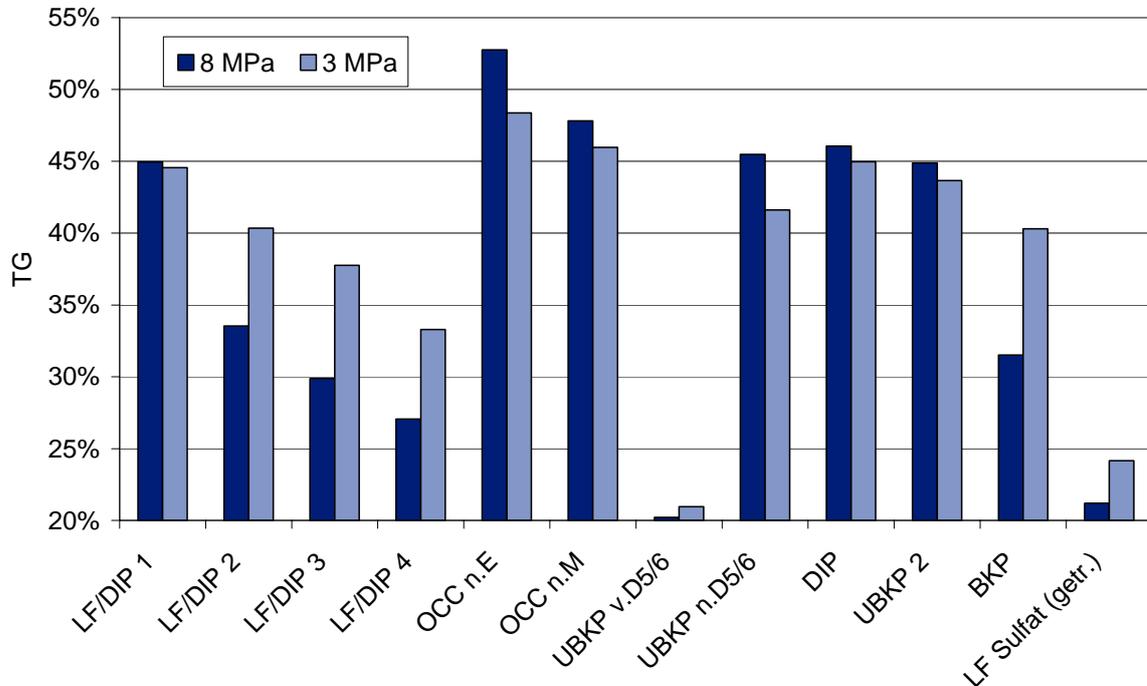


Diagramm 5-10: „Standardpresse“ mit den Einstellungen: LL=1400 kN/m, $v_{PM}=1000$ m/min, (PI=84 kPa s), FbM=60 g/m², T=50 °C $TG_{in}=20\%$, Filzanzahl=1

Der Grund weshalb die Trockengehalte der Stoffe „UBKP vor D5/6“ und „LF Sulfat“ nicht weit über 20% kommen ist, dass diese Faserstoffe nur einen sehr kleinen Massenexponenten besitzen. Der vergleichsweise kleine Pressimpuls kann deshalb nicht auf niedrige Grammaturen übertragen werden. Es wirkt sich so aus als würde eine „FiberXPress-Grammatur“ mit diesem Pressimpuls belastet werden.

Ansonsten liegen die berechneten Trockengehalte in einem realistischen Bereich.

Sehr schön ist wieder die Abhängigkeit zwischen SR bzw. des WRV und erzielten Trockengehalt zu sehen. Nicht nur bei den Stoffen LF/DIP sondern auch bei den OCC Stoffen kann in der vorgegebenen Zeit mit steigendem SR weniger Wasser entfernt werden.

Einige Stoffe profitieren stärker von niedrigen Druck und längerer Verweilzeit als andere. Bei den OCC, DIP und UBKP Stoffen wird beispielsweise mit 8 MPa, und damit einer kürzeren Schuhlänge, ein höherer Trockengehalt erzielt. Dies spricht dafür, dass bei diesen Rohstoffen der Strukturdruck dominierend ist. Auch der „LF/DIP 1“ gehört noch zu dieser Gruppe. Im Gegensatz dazu stehen die Stoffe deren Entwässerung vom hydraulischen Druck geprägt ist. Sie erreichen einen höheren Trockengehalt mit längerer Verweilzeit, der

Druck ist dabei nicht von Bedeutung. Die Feststellungen decken sich mit jenen von Diagramm 5-3.

Eine weitere Herangehensweise, das unterschiedliche Verhalten bei gleicher Linienlast und verändertem Maximaldruck zu erklären, ist die Umrechnung des realen Pressimpuls auf einen „FiberXPress-Impuls“ mit Hilfe einer Näherungsformel (Formel (21)) [34].

Die in der Formel enthaltenen quadratischen Beziehungen der flächenbezogenen Masse werden durch den Massenexponenten m ersetzt.

$$(21) \quad I_{FXP} = I_{PM} \cdot \frac{W_{FXP}^m}{W_{PM}^m} \cdot \frac{\eta_{FXP}}{\eta_{PM}} \cdot 2^m$$

Der Multiplikationsfaktor (2^m) wurde eingeführt, da die Entwässerung in einer doppelt befizten Papiermaschine über zwei Seiten erfolgt. Dadurch halbiert sich die Strecke die das Wasser zurücklegen muss und somit flächenbezogene Masse.

Die Viskosität im FXP wird mit einer Temperatur von 25°C berechnet, die Papiermaschinentemperatur wird mit 50°C angenommen. Um den Pressimpuls mit jenem in Diagramm 5-5 vergleichen zu können, wird eine Grammaturn von 1000 g/m² eingesetzt. Der gemittelte Massenexponent („UBKP v. D5/6“ und „LF Sulfat“ ausgenommen) beträgt circa 2,5 und wird für m in die Formel (21) eingesetzt.

$$I_{FXP} = 84000 \cdot \frac{1000^{2,5}}{60^{2,5}} \cdot \frac{0,000885}{0,000552} \cdot 2^{2,5} \approx 864 \text{MPa} \cdot \text{s}$$

Vergleicht man bei diesem Pressimpuls das Druckverhalten der Stoffe aus Diagramm 5-5 erreichen die Stoffe OCC, UBKP und DIP bei höherem Druck einen höheren Trockengehalt. Der Rohstoff „LF/DIP 3“ verhält sich umgekehrt.

Da die Stoffe sehr unterschiedlich im Bezug auf den eingesetzten Grammaturbereich und der Papiermaschinengeschwindigkeit sind, hat sich bei den Betriebsparametern eine Mischung zwischen den niedrigen Grammaturn und den hohen Papiermaschinengeschwindigkeiten, und den hohen Grammaturn und den niedrigen Papiermaschinengeschwindigkeiten ergeben.

Aus diesem Grund werden im nächsten Schritt die UBKP Stoffe separat betrachtet.

Die Betriebsparameter der Single-Nip Schuhpresse für diese Stoffe sind folgende:

TG_{in}=20%

FbM=160 g/m²

LL=1400 kN/m

w_{PM}=700 m/min

T=50 °C

Filzanzahl=1

Rückbefeuchtungsterm aus Tabelle 5-1, Seite 69 durch 10 dividiert (Skalierung auf Literaturwert)

Der Pressimpuls ergibt sich aus Formel (1), und beträgt 120 kPa s. Die mit dem Modell berechneten Ergebnisse sind in Diagramm 5-11 dargestellt. Wie zuvor sind zwei Drücke bzw. zwei verschiedene Schuhlängen berechnet worden. Hier ist der Maximaldruck der einer Schuhlänge von ~300 mm entspricht in dunkelblau dargestellt, in hellblau der Maximaldruck von 3 MPa mit der fiktiven Schuhlänge von 700 mm. Es ist zu erkennen, dass sich die Stoffe, obwohl sie zur selben Gruppe gehören, deutlich unterscheiden. Beispielsweise benötigt der „UBKP 2“ mehr Zeit für die Entwässerung. Sehr interessant ist auch, dass der Stoff mit dem höheren Wasserrückhaltevermögen einen höheren berechneten Trockengehalt erreicht. Dies deckt sich eigentlich nicht mit der Theorie, da ein hohes WRV einem niedrigen Trockengehalt entspricht. In der Praxis zeigt sich aber ein ähnliches Bild. Obwohl der Stoff „UBKP 2“ einen niedrigen WRV Wert hat, entwässert er nur sehr schlecht.

Dieses Beispiel zeigt, dass es mit den ermittelten Parametern gut möglich ist qualitative Vorgänge zu beschreiben.

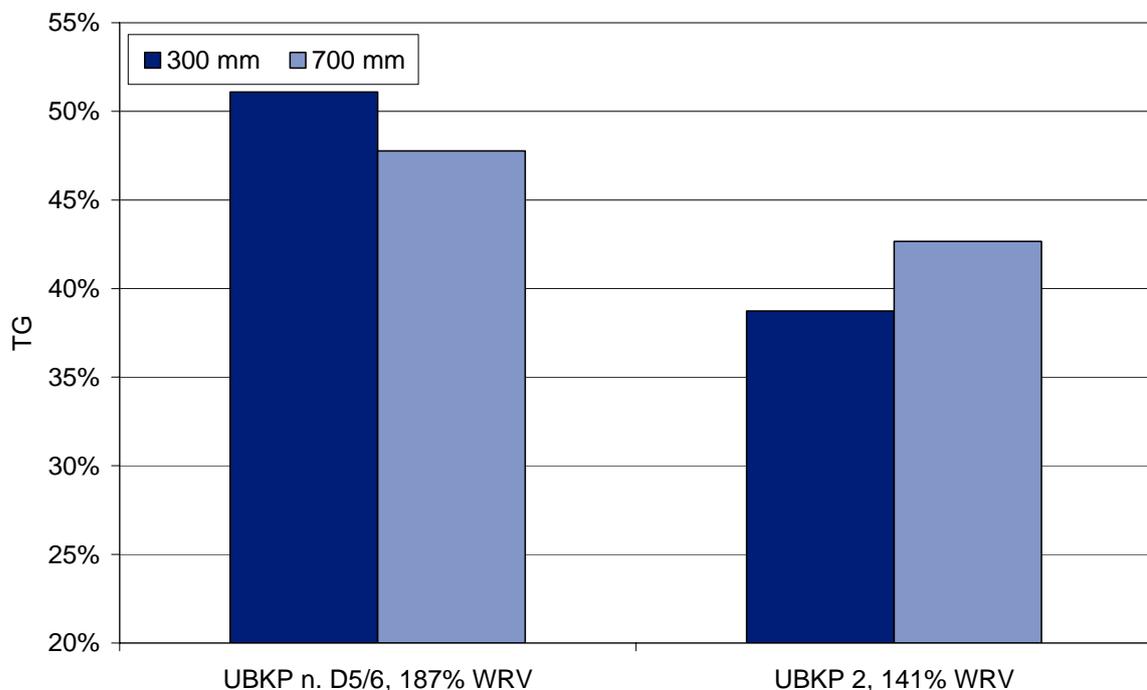


Diagramm 5-11: Anwendung der Betriebsparameter einer Single-Nip Schuhpresse auf die UBKP Stoffe

5.2.5 Anlagenvergleich

Der Anlagenvergleich soll ebenfalls ein Test sein, ob die ermittelten Parameter aus den FiberXPress Daten auf reale Situationen angewendet, plausible Ergebnisse liefern. Von zwei gemessenen Stoffen sind die Betriebsparameter der Presse bekannt. Es ist aber schwierig mit Anlagendaten Vergleiche anzustellen, da der Trockengehalt nach der Presse in der Papiermaschine stark variiert. Ein Beispiel dafür ist der Einfluss des Filzes. Der Trockengehalt kann sich, abhängig vom verwendeten Filz und dessen Einsatzdauer, um rund 3% ändern. Außerdem wird die Summe der Linienlasten aus den einzelnen Pressnips für die Berechnung verwendet. In der Praxis unterscheiden sich die Maximaldrücke dieser

Nips, dies wird hier nicht berücksichtigt. Die Entwässerung wird auch durch die Form des Druckprofils beeinflusst, dies ist in Kapitel 2.2.1 erläutert worden. Bei den Messungen mit FiberXPress ist immer ein Rechteckprofil verwendet worden, dies unterscheidet sich natürlich von den realen Druckprofilen (siehe Abbildung 2-2, Seite 4).

5.2.5.1 Unbleached Kraft Pulp

Die Anlagendaten sind aus einem Voith Bericht [35]

FbM [g/m ²]	w _{Sieb} [m/min]	T [°C]	TG _{in} [%]	TG ₂ [%]	TG _{out} [%]	LL ₁ [kN/m]	LL ₂ [kN/m]	LL ₃ [kN/m]
184	770	55?		35,0	44,3	95	135	1000

Der Pressimpuls wird mit Formel (1) berechnet:

$$PI_{LL1+LL2}=17,9 \text{ kPa s}$$

$$PI_{LL3}=77,9 \text{ kPa s}$$

Für die Berechnung werden die Parameter des „UBKP nach D5/6“ verwendet, da dieser Stoff mehr Ähnlichkeit mit dem eingesetzten Stoff hat.

Setzt man nun in Formel (18) mit Berücksichtigung der Rückbefeuchtung die Parameter dieses Stoffes (siehe Tabelle 5-1) ein und TG₂ für den Starttrockengehalt, PI_{LL3} für den Pressimpuls so erhält man, für einen Maximaldruck von 6 MPa, einen Trockengehalt von 49,23%. Verglichen mit dem tatsächlich erreichten Trockengehalt der Maschine ergibt das eine Abweichung von 4,9 Punkten. Der Trockengehalt von 49,23% wird mit einer Temperatur von 55°C berechnet und die Anzahl der Filze wurde auf 1 gesetzt.

Wird hingegen ein Maximaldruck von 3 MPa angenommen, berechnet das Modell einen Endtrockengehalt von 47,47% und für 9 MPa 49,54%.

Dies zeigt, dass die Erhöhung des Drucks auf 9 MPa keinen großen Vorteil mehr mit sich bringt.

Dies wurde auch im Voith Bericht [35] beobachtet. Der Versuch einen Starttrockengehalt von 20% anzunehmen und mit dem gesamten Pressimpuls auf den Endtrockengehalt zu rechnen ergibt 49,61% bei einem maximalen Druck von 6 MPa.

5.2.5.2 Deinked Pulp

Daten der Anlage:

FbM [g/m ²]	w _{Sieb} [m/min]	T [°C]	TG _{in} [%]	TG _{out} [%]	LL ₁ [kN/m]	LL ₂ [kN/m]	LL ₃ [kN/m]
40	940	?	20	45	65	75	100

Aus der Summe der drei Linienlasten ergibt sich ein Pressimpuls von 15 kPa s.

Zur Berechnung werden die Parameter des DIP aus Tabelle 5-1 verwendet und in Formel (18) mit Berücksichtigung der Rückbefeuchtung eingesetzt. Die Startwerte sind ein Eingangstrockengehalt von 20%, eine Grammaturn von 40 g/m² und der berechnete

Pressimpuls. Da die Temperatur nicht bekannt ist werden vorerst 50°C eingesetzt. Als Maximaldruck wird 6 MPa verwendet, die Anzahl der Filze auf 1 festgelegt.

Mit diesen Einstellungen wird ein Trockengehalt von 38,3% erreicht. Die Abweichung zum tatsächlich erreichten Trockengehalt nach der Presse ist etwas höher als im Beispiel des UBKP.

Wird der Maximaldruck von 6 auf 9 MPa angehoben ergibt sich ein Trockengehalt von nur noch 37,6%. Dies lässt darauf schließen, dass dieser Stoff sensitiver auf eine längere Presszeit ist, als auf einen hohen Maximaldruck.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden mit der pneumatischen Presse FiberXPress verschiedene Rohstoffe auf ihre Entwässerungseigenschaften untersucht.

Das Hauptaugenmerk wurde auf die Abhängigkeit der Messergebnisse von der flächenbezogene Masse und des Druckes gelegt. Aus diesem Grund wurden pro Stoff jeweils 6 Grammaturen (750-3000 g/m²) und 3 Drücke (3, 6 und 9 MPa) gemessen.

Ein weiteres Ziel der Arbeit war die Messdaten der FiberXPress mit einem Modell zu beschreiben, und charakteristische Parameter zur Beurteilung der Entwässerbarkeit eines Faserstoffes in der Presse zu ermitteln.

Dazu wurden erst verschiedene Modelle aus der Literatur evaluiert. Das sogenannte, Limiting-Consistency model [21], ermöglichte die beste Beschreibung der Messdaten.

Es hat sich gezeigt, dass dieses Modell abgeändert und erweitert werden muss, um die FiberXPress-Daten zufriedenstellend zu beschreiben.

Konkret bedeutet dies, dass ein Druckterm hinzugefügt werden musste, da festgestellt wurde, dass bei gleichem Pressimpuls und unterschiedlichen Maximaldrücken der erreichte Trockengehalt sich deutlich unterscheidet. Der Pressimpuls alleine reicht also nicht aus, um den Trockengehalt nach der Presse zu berechnen. Der hinzugefügte Druckterm legt fest, wie hoch der limitierende Grenzrockengehalt, bei einem bestimmten Druck ist.

In der originalen Formel ist der Exponent der die Grammaturabhängigkeit beschreibt auf den Wert 2 festgelegt. Da aus der Praxis Beispiele bekannt sind, dass dies nicht immer zutrifft, ist der Exponent über der Grammatur durch einen variablen Parameter ersetzt worden.

Es wurde außerdem noch festgestellt, dass Rückbefeuchtungseffekte durch Sieb und Kanüle eine maßgebliche Rolle spielen, speziell bei niedrigen Grammaturen. Aus diesem Grund ist ein Rückbefeuchtungsterm eingeführt worden, der die Effekte in kg Wasser pro m² wiedergibt.

Die Parameter sind durch Minimierung der Summe der Fehlerquadrate zwischen Messdaten und Modell mit Hilfe des Excel Solvers ermittelt worden.

Das erweiterte Modell, mit nun 5 Parametern, beschreibt die Messdaten mit einer durchschnittlichen Standardabweichung von ~1,5% Trockengehalt.

Nach einer Analyse der Parameter bezüglich der Abhängigkeit untereinander ist festgestellt worden, dass der Parameter k und der Grenzrockengehalt eng miteinander verbunden sind. Dies lässt darauf schließen, dass das System mit 5 Parametern überbestimmt ist. Daher wäre es notwendig weitere Untersuchungen in dieser Richtung zu tätigen, um eventuell mit nur 4 Parametern auszukommen. Aufgrund der Abhängigkeit der Parameter untereinander ist die individuelle Bewertung einzelner Parameter schwierig, als Parametersatz bilden sie aber eine gute Grundlage für weitere Analysen.

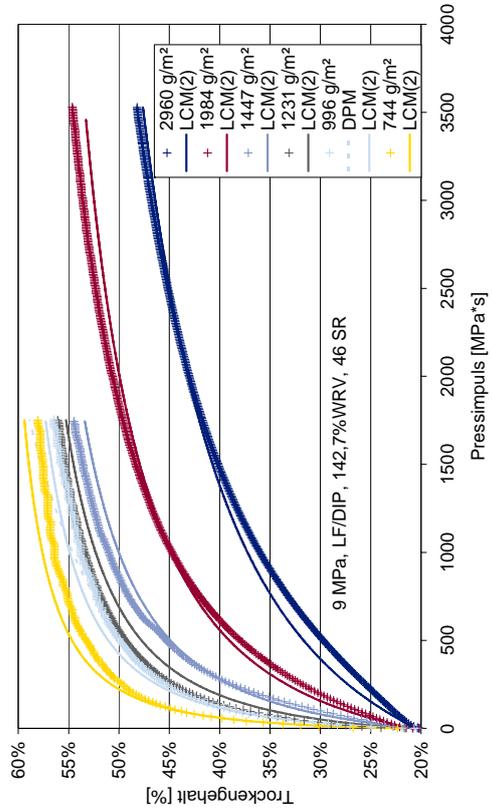
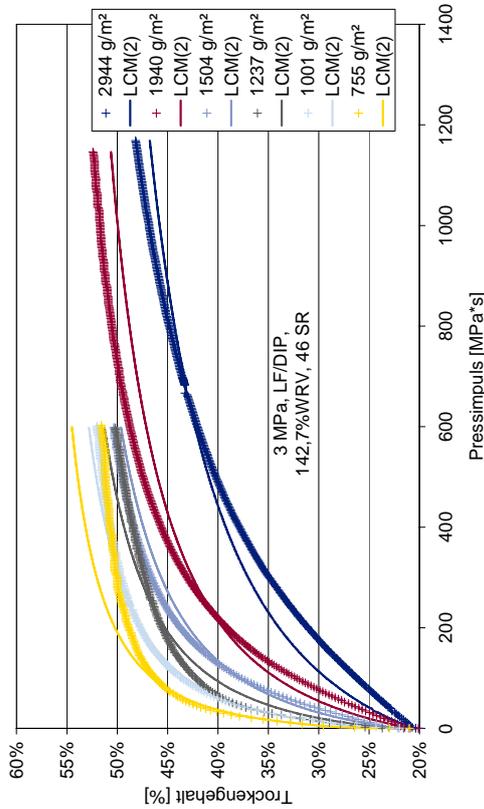
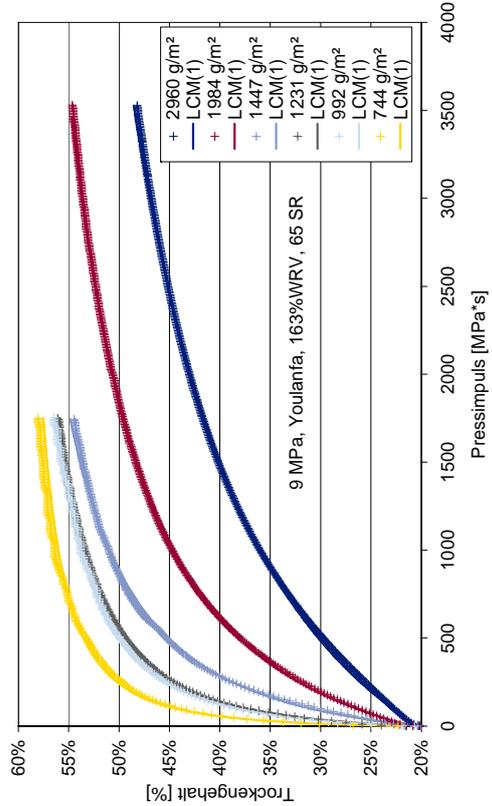
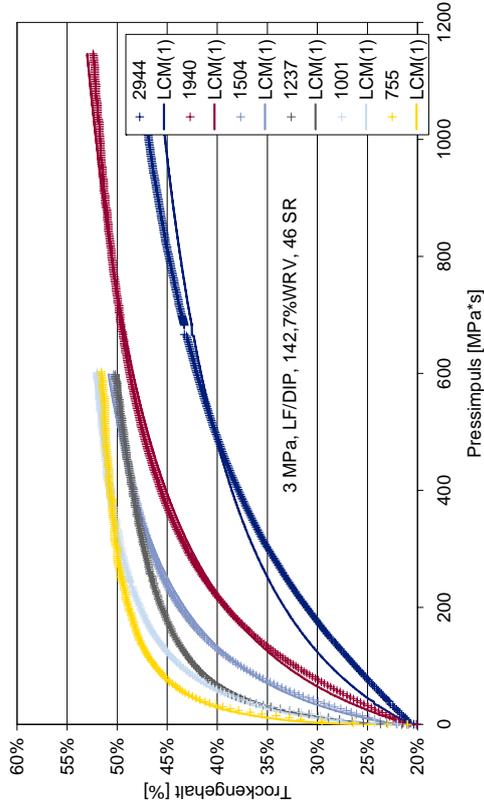
Da der Messaufwand mit 18 Messungen pro Stoff (36 bei einer Doppelbestimmung) relativ groß ist, wurden noch Versuche zur Messreihenreduzierung durchgeführt.

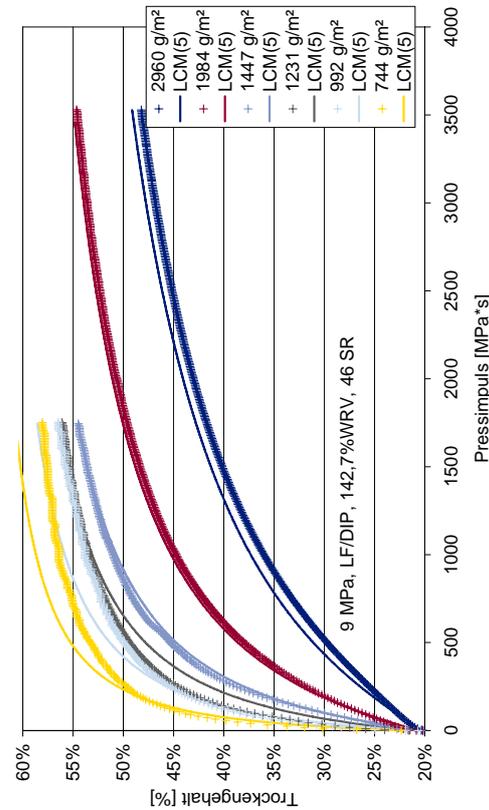
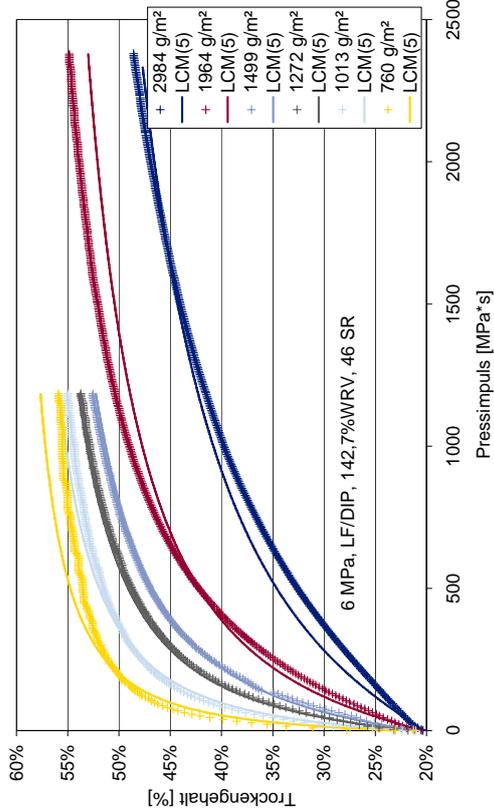
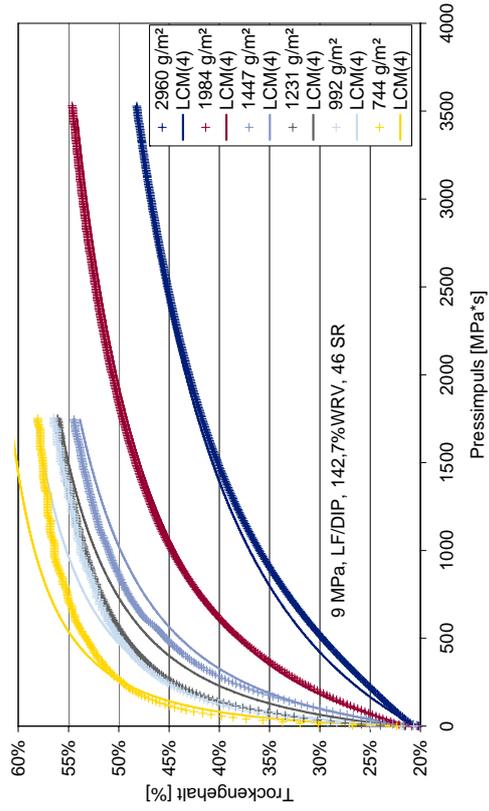
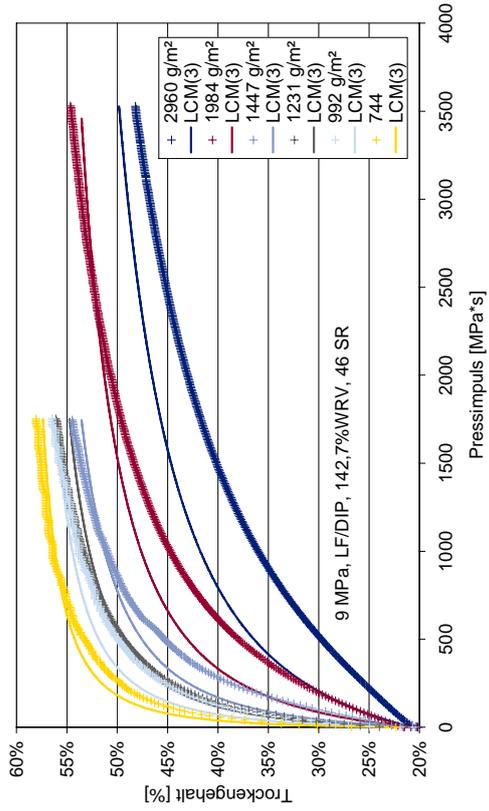
Es zeigte sich, dass der Messaufwand um ein Drittel reduziert werden kann, bei etwa gleich guter Beschreibung der Messdaten.

Für die Rohstoffcharakterisierung hinsichtlich Pressenentwässerung ist FiberXPress zweifelsohne eine Bereicherung zu den gängigen Methoden, da der gesamte Entwässerungsverlauf beschrieben wird. Die Ermittlung eines globalen Parametersatzes für einen Rohstoff liefert eine kompakte Form, das Entwässerungsverhalten zu charakterisieren und somit einen ersten Ansatz zur Übertragbarkeit auf reale Pressen. Es wurde gezeigt, dass qualitative Aussagen mit Hilfe der ermittelten Parameter möglich sind. Um mehr Informationen bezüglich der Korrelation zwischen den FiberXPress Messdaten und realen Pressenpartien zu erhalten, sind Feldstudien an Versuchs- oder Produktionsanlagen nötig. Durch die Messreihenreduzierung ist der dafür benötigte Messaufwand deutlich reduziert worden.

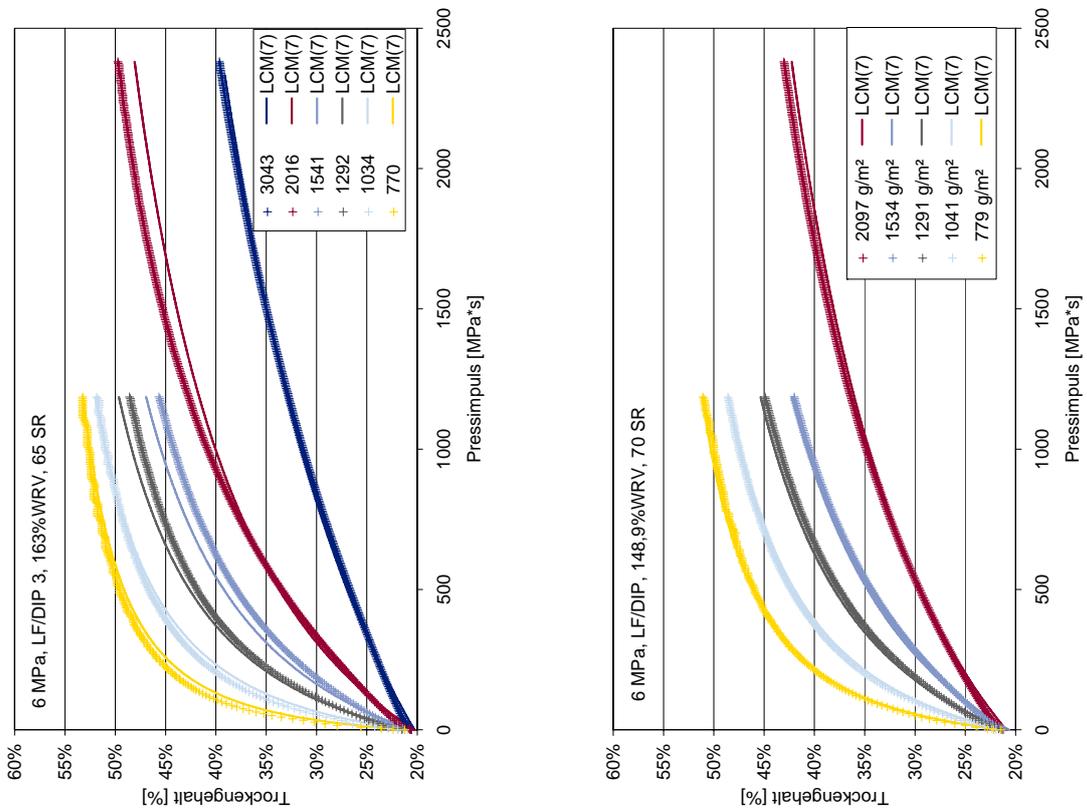
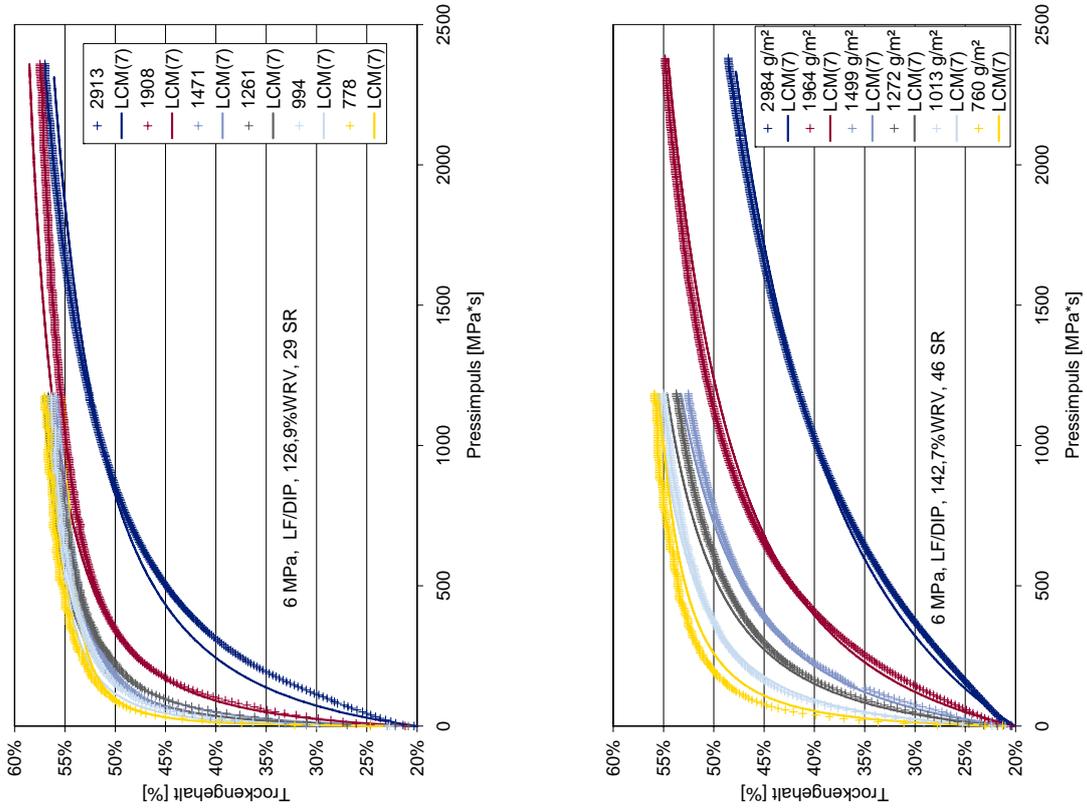
Anhang

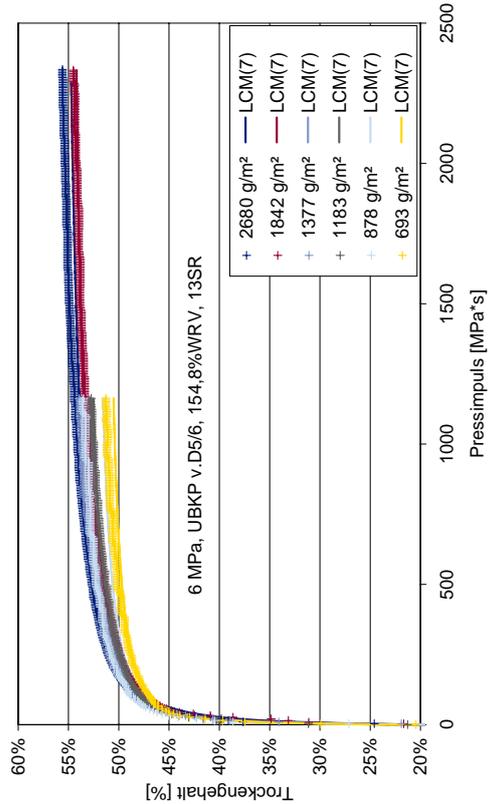
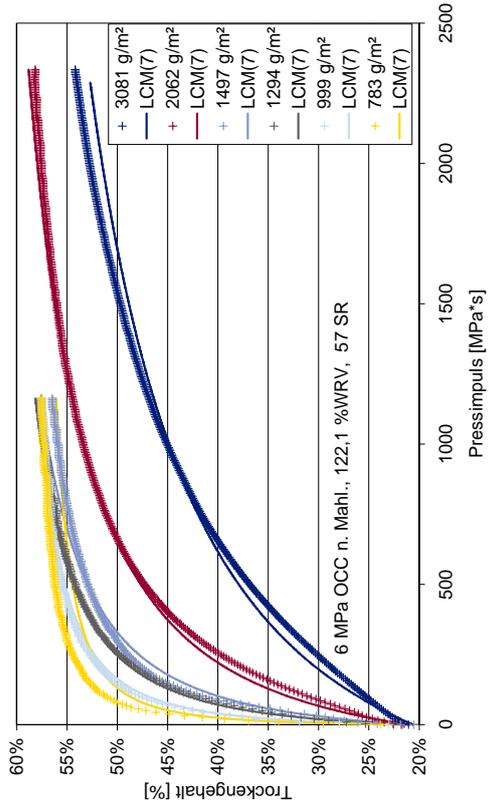
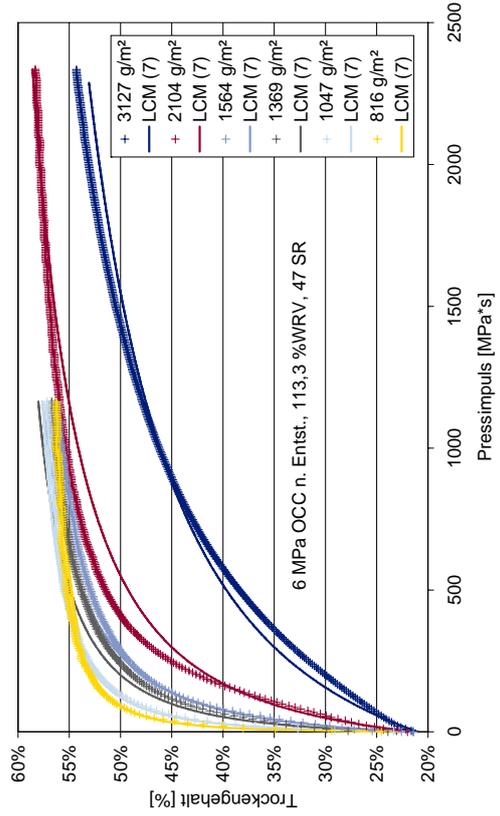
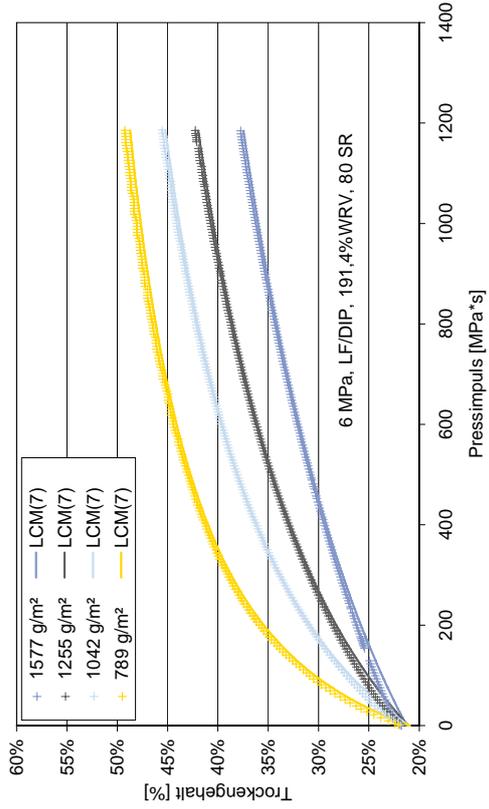
Vervollständigung der Diagramme aus Kapitel 4.3, 4.4.1 und 4.4.2

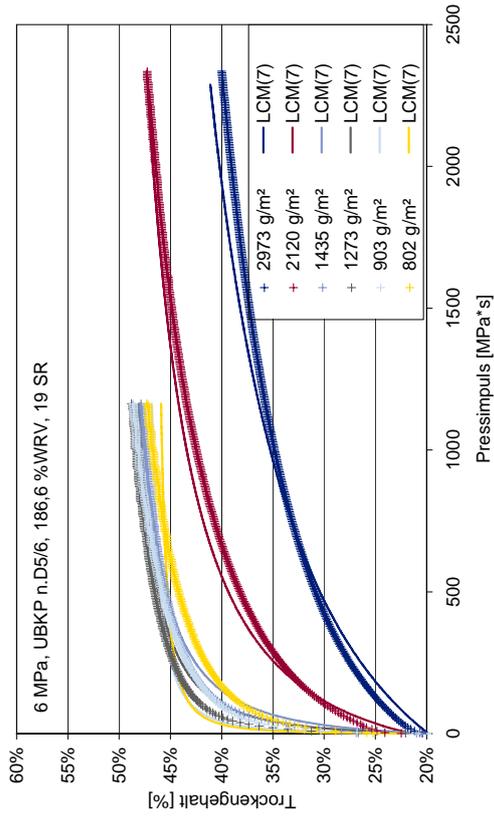




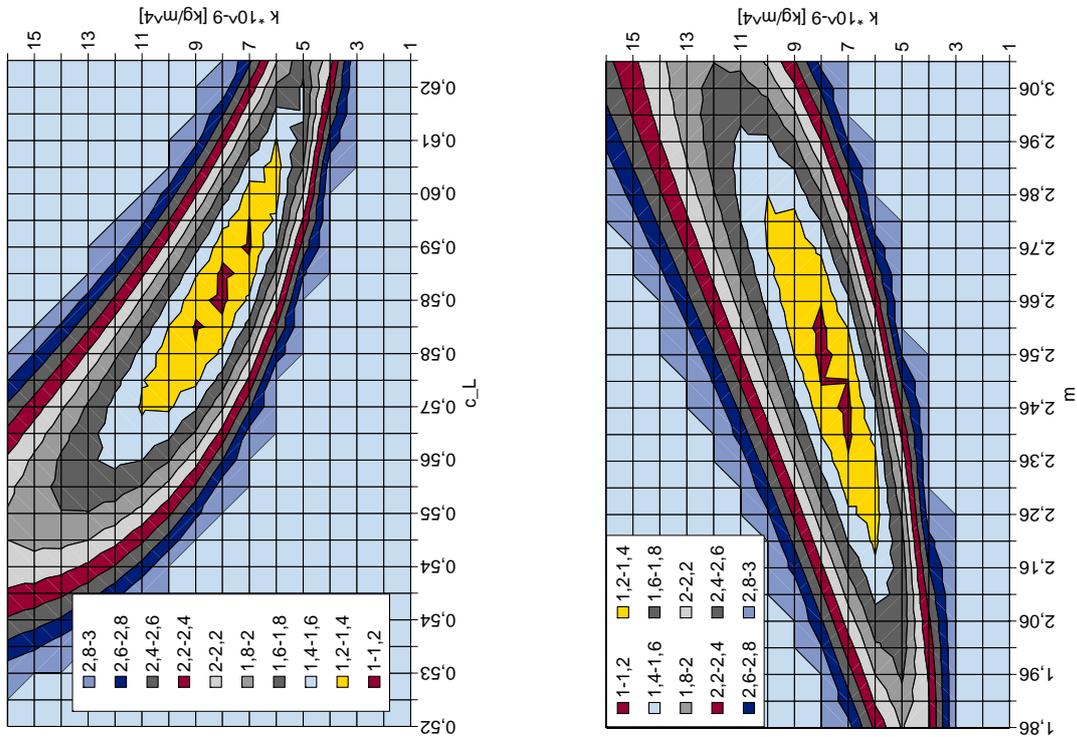
Vergleich der Messdaten (bei 6 MPa) mit dem Modell das die Rückbefeuchtung berücksichtigt; vgl. Kapitel 4.4.6

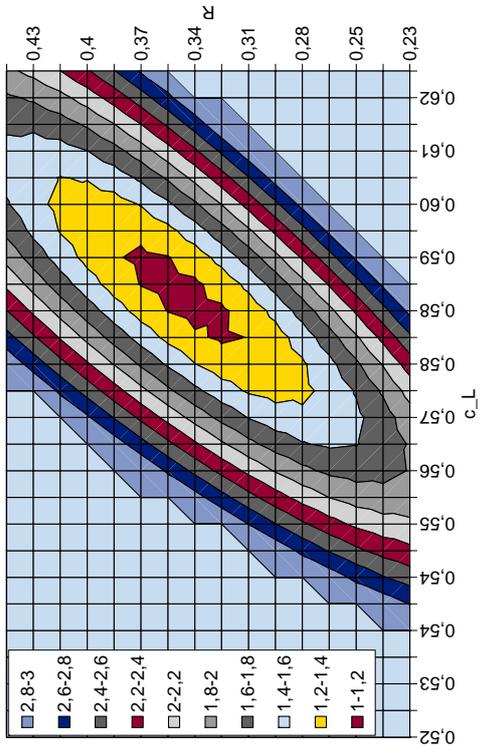
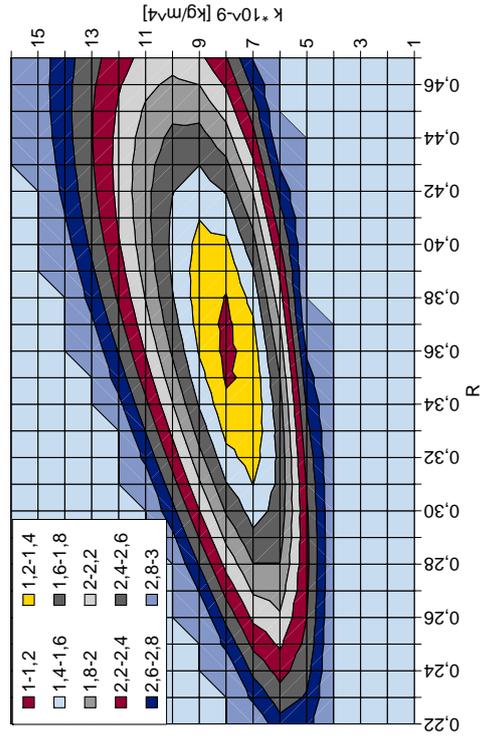
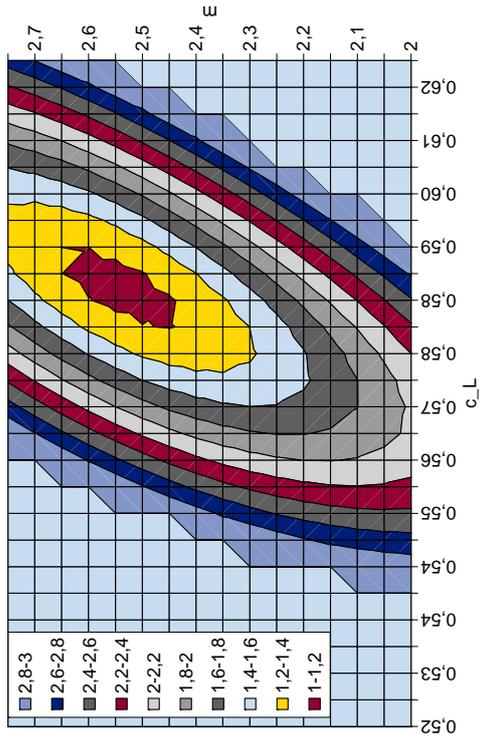






Abhängigkeiten der Standardabweichung (Legende) von verschiedenen Parameterkombinationen für den DIP Stoff bei 6 MPa





CD-Rom der Messdaten und Auswertungen

Abkürzungsverzeichnis

BKP: Bleached Kraftpulp

CCV: Centrifugal Compression Value

CSF: Canadian Standard Freeness

DIP: Deinked Pulp

FXP FiberXPress

LCM: Limiting-Consistency Model

LF: Langfaser

LL: Linienlast

LWC: Lightweight Coated

mr: moisture ratio

OCC: Old Corrugated Cardboard

otro: ofen trocken

PI: Pressimpuls

Re: Reynolds-Zahl

SBK: Softwood bleached Kraft

SR: Schopper-Riegler

SSE: Sum of square of residuals

SST: Total sum of squares

UBKP: Unbleached Kraftpulp

VD: Vordruck

WRV: Wasser-Rückhalte-Vermögen

ZS: Zeitschritte

Formelsymbole

$a...$	Permeabilitätskoeffizient [kg/m]	$n...$	Kompressibilitätsfaktor [1]
$A...$	Querschnittsfläche [m ²]	$N...$	Anzahl der Werte [1]
$b...$	Parameter b [kg ² /m ⁴]	$p(t)...$	Druck zum Zeitpunkt t [MPa]
$C'...$	Scheinbarkompressiver E-modul [Pa]	$p...$	Druck [Pa]
$c_L...$	Grenztrockengehalt [%]	$p_{ave}...$	mittlerer Nipdruck [MPa]
$c_N...$	Niptrockengehalt [%]	$p_{max}...$	Maximaldruck [MPa]
$c_s...$	Starttrockengehalt [%]	$PK...$	Pressenkennzahl [m ² /Ns]
$d...$	Druckexponent [1]	$PK_0...$	temperaturabhängige Pressenkennzahl
$d_h...$	hydraulischer Durchmesser [m]	$\theta_{s,v}...$	Volumsbezogene spezifische Oberfläche [m ² /m ³]
$\Delta p...$	Druckdifferenz [Pa]	$Q...$	Volumenstrom [m ³ /s]
$\Delta p_h...$	hydraulische Druckdifferenz [Pa]	$\rho...$	Dichte [kg/m ³]
$\varepsilon...$	Porosität [1]	$R^2...$	Bestimmtheitsmaß
$\varepsilon_s...$	Packungsdichte [1]	$R...$	Rückbefeuchtung [kg/m ²]
$F_L...$	Linienlast [kN/m]	$r...$	Innenradius [m]
$\eta...$	dynamische Viskosität [Pa s]	$t...$	Verweilzeit im Nip [s]
$I...$	Pressimpuls [Pa s]	$\tau...$	Entwässerungszeitkonstante [s]
$i...$	Impulsexponent [1]	$T...$	Temperatur [°C]
$K...$	Kozeny-Faktor [1]	$t_1...$	Zeit, Nipanfang [s]
$k...$	Parameter k [kg ² /m ⁴]	$t_2...$	Zeit, Nipende [s]
$\kappa...$	Permeabilität [m ²]	$t_m...$	mittlere Zeit im Nip [s]
$L...$	Faserbetttiefe [m]	$W...$	Grammatur [kg/m ²]
$L_E...$	Fließbetttiefe [m]	$w...$	Geschwindigkeit [m/s]
$\lambda...$	Rohrreibungszahl [1]	$w_m...$	mittlere Geschwindigkeit [m/s]
$l...$	durchströmte Länge [m]	$w_{PM}...$	Maschinengeschwindigkeit [m/min]
$l_{ch}...$	charakteristische Länge [m]	$Y_i...$	Istwert auf y-Achse
$m...$	Massenexponent [1]	$\hat{Y}_i...$	Y Wert an Funktion angeglichen
$mr...$	moisture ratio [1]		
$mr_0...$	Anfangs moisture ratio [1]		
$\nu...$	kinematische Viskosität [m ² /s]		

Literaturverzeichnis

- [1] BOS, J.H.; Das Papierbuch, Handbuch der Papierherstellung, 2006.
- [2] WAHLSTROM, B.; Our present understanding of the fundamentals of pressing; Pulp and Paper Magazine of Canada, 70, Nr. 19, T349 (1969).
- [3] WAHLSTROM, B.; Wet pressing in the 20th century: Evolution, understanding and future; Pulp and Paper Canada, 102:12 (2001).
- [4] REESE, A.R.; Paper Mashine Wet Press Manuel; 4th Edition, Tappi.
- [5] WENDT, C.; Rohstoffcharakterisierung hinsichtlich Pressenentwässerung mittels einer pneumatischen Presse; Diplomarbeit, FH München, 2006.
- [6] SPRINGER, A., NABORS, N.A., BAHTIA, O.; The influence of fibre, sheet structural properties, and chemical additives on wet pressing; Tappi Journal, 74, Nr. 4:221 (1991).
- [7] VOMHOFF, H.; Dynamic compressibility of water-saturated fibre networks and influence of local stress variation in wet pressing; Ph.D. thesis, Stockholm 1998.
- [8] PAULAPURO, H.; Wet pressing-Present understanding and future challenges; 12th Fundamental Reseach Symposium, Oxford, September 2001.
- [9] CARLSSON, G., LINDSTROM T., SÖREMARK, C.; Expression of water from cellulosic fibres under compressive loading; Trans. Vith Fund. Res. Symp. Oxford, 1977, (Fundamental Research Committee, ed.), FRC, Manchester, 2003.
- [10] LAIVINS, G.V., SCALLAN, A.M.; Removal of water from pulps by pressing. Part I: Inter- and Intra-wall water; Engineering Conf. (1993) 741.
- [11] GRAHAM ALLEN, G., CARROLL J.P., PARAMAPORN DEVAKULA, M.L., GAW, K., JOSEPH, A.A, PICHITLAMKEN, J.; The effect of filler location on the drainage, pressing and drying of pulp and paper; Tappi Journal, 80, Nr.8:175 (1997).
- [12] KARTOVAARA, I.; Der Einfluß von Chemikalien auf die Entwässerung in der Pressenpartie; Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr.13, 463 (1984).
- [13] BUSKER, L.H., CRONIN, D.C.; The relative importance of wet press variables in water removal; Pulp and Paper Canada, 85:6 (1984).
- [14] KRITZIGER, J.; Charakterisierung des Entwässerungsverhaltens von Faserstoffen in der Presse; Diplomarbeit, TU Graz, 2006.
- [15] SAUKKO, T.; Potential of the MTS press simulator for wet pressing research; Master Thesis, Helsinki University of Technology, Finland, 2006.

- [16] GUY, N.; Developement of a method to determine the press dewatering with an existing laboratory press (STFI); Diplomarbeit, INP Grenoble, France, 2004.
- [17] YOUNG, T.L., CAULFIELD, D.F., WEGNER, T.H. ;The role of web properties in water removal by wet pressing; Tappi Journal, Vol. 65, No. 65 (1982).
- [18] YOUNG, T.L., CAULFIELD, D.F., WEGNER, T.H. ;Role of web properties in water removal by wet pressing- influence of basis weight and forming method; Tappi Journal, Vol. 66, No. 10 (1983).
- [19] GUDEHUS, T. ;Stoffentwässerung am Walzenspalt; Das Papier, 42, Nr. 174 (1988).
- [20] CLOS, R.J., LOUIS, L.E. ;Application of the limited consistency web compression model to vacuum- assisted drainage cell tests; Tappi Journal, Vol. 78, No. 7, p. 107 (1995).
- [21] CLOS, R.J., EDWARDS, L.L., GUNAVAN, I.;A limited consistency model for pulp dewatering and wet pressing; Tappi Journal, Vol. 77, No. 179 (1994).
- [22] MCDONALD, J.D, KEREKES, R.J.; A decreasing permeability model of wet pressing: theory; Tappi Journal 74, Nr. 150 (1991).
- [23] MCDONALD, J.D, KEREKES, R.J.; A decreasing permeability model of wet pressing with rewetting; Tappi Journal 78, Nr. 107 (1995).
- [24] MCDONALD, J.D, KEREKES, R.J.;A decreasing permeability model of wet pressing: Applications; Tappi Enineering Conference 1991, p.559.
- [25] EICHLER, A.; Modeling of Pressdewatering- Diplomarbeit N. Guy revisited; Voith Report, 2006.
- [26] HOLSTEGE, G.H.J. ;Press dewatering new life for an old concept; Tappi Journal, Vol. 81, No. 115 (1997).
- [27] I' ANSON, S., ASHWORTH, T. ;Differentiated Permeability Surface Layer (DPSL) Pressing Theory; Tappi Journal, Vol.83, No. 70 (2000).
- [28] Betriebsanleitung FiberXPress V 0.95.
- [29] <http://www.zellstoff-poels.at/>, eingesehen am 25.5.2011.
- [30] HOFMANN, A.M.; Rohstoffcharakterisierung hinsichtlich Einfluss auf Entwässerungsverhalten in der Pressenpartie mittels FXP III; Bachelorarbeit, Hochschule Ravensburg- Weingarten, 2009.
- [31] HAMETER, M. ;Zusammenfassung zu Versuchen mit Sputnik; Voith Praktikumsbericht, 2006.
- [32] SWEET, J.S.; A Basic Study of Water Removal at the Press, Pulp and Paper Magazin Canada, V62(8): T376.

[33] KAMPER, H.; Allgemeine Auswertung zu Pressenversuchen; Voith pf-Bericht, Nr. 0404.

[34] BLÄSING, S; Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Entwässerung von Faserstoffen in der Pressenpartie unter besonderer Beobachtung der initialen Nassfestigkeit; Diplomarbeit, FH München, 2008.

[35] WENDT, C. EICHLER, A.; FiberXPress Studie: Smurfit Kappa Nettingsdorfer; Voith Bericht, 2007.