Teil III. Untersuchungen zur Halmfestigkeit : Laborversuche an der EMPA

Objekttyp: Chapter

Zeitschrift: Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der Eidg. Tech. Hochschule, Stiftung Rübel, in Zürich

Band (Jahr): 101 (1989)

PDF erstellt am: 02.05.2024

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek* ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

3. LABORVERSUCHE AN DER EMPA

3.1. VERSUCHSEINRICHTUNG

An der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt in Dübendorf ZH (EMPA), Abteilung Holz, stand uns eine Prüfpresse mit den für unsere Zwecke erforderlichen Eigenschaften zur Verfügung:

- Abmessungen zur Bearbeitung von Prüflingen der Größenordnung 1/2 m
- Arbeitsbereich für die Kraft in der Größenordnung 200 N
- Stetige Messung und Aufzeichnung von Kraft und Verformung (Traversenweg)
- Regulierbare Geschwindigkeit der Lastzunahme

Als statisches System (Fig. 3.1.) wählten wir eine Vierpunktlagerung nach Fig. 1.7., Anordnung 3 (beidseitig aufgelegt, in zwei symmetrisch liegenden Punkten belastet). Dieses System hat gegenüber den anderen Anordnungen den großen





F = Last $D = f \ddot{u} r das geprüfte Schilfst \ddot{u} ck als repräsentativ gewählter Durchmesser$

Vorteil, daß über einen längeren Bereich, nämlich zwischen den beiden Krafteinleitungspunkten, das gleiche maximale Biegemoment wirkt. Der Ort des Bruches ist damit nicht zum vorneherein festgelegt, sondern wird an der schwächsten Stelle dieses Abschnitts eintreten. Liegt der Ort des Bruchs in einiger Entfernung von den Lasteinleitungspunkten, so hat man die Gewähr, daß es sich um einen reinen Biegebruch handelt, d.h. das Versagen des Halmes wird nur durch das Biegemoment bewirkt und nicht etwa (auch noch) durch den Querdruck (Quetschen) bei der Krafteinleitung. Durch Probieren fanden wir für unsere Schilfhalme mit einer Internodienlänge in der Größenordnung von 30 cm die günstigsten Abmessungen für das Mittel- und die beiden Randfelder:

Mittelfeld: $l_b = 7 \text{ cm}$ Randfelder: $l_a = 10 \text{ cm}$

Bei einigen der kleinsten Halme mußten wir die Länge der Außenfelder auf 5 cm reduzieren.

Ebenfalls durch Probieren fanden wir die günstigste Laststellung (vgl. Fig. 3.1.), so daß in vielen Fällen tatsächlich reine Biegebrüche zu verzeichnen waren: Das maximal belastete Mittelfeld muß im (morphologisch) untersten Teil eines Internodiums liegen, die eine Lasteinleitungsstelle fällt somit auf einen Knoten, die andere befindet sich (morphologisch) 7 cm weiter oben.

Auch mit dieser Anordnung entstanden nicht ausschließlich reine Biegebrüche. Besonders die schwächeren Proben (vor allem Stücke aus den oberen Halmpartien) brachen häufig bei der oberen Lasteinleitungsstelle, also unter (Mit-)Einwirkung des Querdruckes. Die genaue Beobachtung der Halme während der Versuche zeigte jedoch, daß bei der gewählten Prüfanordnung oft mehr oder weniger zufällig die eine oder andere Bruchart erfolgte: Im Mittelfeld zeigten sich bereits Anzeichen eines Biegebruches, "in letzter Sekunde" brach die Probe aber dann doch im oberen Belastungspunkt. Daraus glaubten wir schließen zu dürfen, daß sich die Bruchart mit dieser Prüfanordnung kaum auf das Prüfergebnis auswirkt. Dafür gibt es eine plausible Erklärung: Die schwächste Stelle des Internodiums liegt etwa 2,5 bis 4 cm oberhalb des Knotens, weiter oben wird der Halm wieder fester; auf der anderen Seite bedeutet die Krafteinleitung (Querdruck) eine zusätzliche Beanspruchung, welche offenbar die gegenüber der schwächsten Stelle höhere Festigkeit annähernd kompensiert.

Die bisher beschriebenen Brucharten sind beides Druckbrüche: Der Bruch erfolgt durch lokales Einbeulen der Halmwand unter der Druckbeanspruchung auf der Innenseite der Krümmung, verursacht durch das Biegemoment und allenfalls verstärkt durch den Querdruck infolge der Krafteinleitung. In selteneren Fällen ereigneten sich auch Zugbrüche im Knoten, wobei die Fasern auf der Außenseite der Krümmung unter der Einwirkung der Biegezugsspannung zerrissen. Die Bruchstelle befand sich in diesen Fällen immer dort, wo die Blattscheide am Stengel angewachsen ist.

Die Tatsache, daß die schwächste Stelle eines Internodiums zumindest bei den von uns untersuchten Schilfhalmen nie mehr als 4cm vom Knoten entfernt war, ermöglichte uns, die noch in BINZ und KLÖTZLI (1978) angegebene Länge l_b des Mittelfeldes von 10cm auf 7cm zu reduzieren.

Besondere Beachtung schenkten wir den Krafteinleitungsstellen (Auflager und Belastung), um jedes unnötige Quetschen der Halme aus den am Schluß des vorigen Kapitels aufgeführten Gründen zu vermeiden. Wegen den Steifigkeitsmessungen konnten wir die Krafteinleitungsstellen nicht polstern, um den Querdruck zu verringern, da dies zusätzliche, unkontrollierbare Verformungen mit



Fig. 3.2. Prüfeinrichtung für Festigkeitsmessungen an Schilf im Labor an der EMPA (vgl. auch Fig. 3.3.)



Fig. 3.3. Photo der in Fig. 3.2. schematisch dargestellten Prüfungseinrichtung für Schilfhalme an der EMPA. Die Metallplatten zwischen den Auflagezylindern und den auf dem Halm aufliegenden Holzklötzchen erwiesen sich als überflüssig und wurden später weggelassen.

sich gebracht hätte. Entscheidend ist, daß sich der Halm in allen vier Punkten (Auflager und Lasteinleitung) möglichst frei drehen kann, damit wirklich die in den Figuren 1.7. und 3.1. dargestellte Verteilung des Biegemomentes entsteht.

Alle diese Überlegungen führten uns zu der in Fig. 3.2. schematisch und in Fig. 3.3. photographisch dargestellten Prüfeinrichtung.

Als Auflager wählten wir dicke Metallzylinder, welche die freie Drehbarkeit der Auflager in diesen Punkten gewährleisteten. Um die Auflagerkraft über eine möglichst große Fläche zu verteilen (Verringerung des Querdrucks), legten wir zwischen Halm und Zylinder kleine Holzklötzchen, welche entsprechend der Halmdicke halbrund ausgeschnitten waren. Damit die Klötzchen vor und während dem Versuch nicht hinunterfielen, belegten wir die halbrund ausgeschnittene Fläche mit doppelseitigem Klebstreifen.

Die Lasteinleitung erfolgte über steife, satt um den Halm gelegte Textilstreifen. Diese waren über je zwei Gelenke mit einem waagrechten Metallbalken verbunden, welcher seinerseits in der Mitte gelenkig mit dem Zugglied der Prüfpresse verbunden war. So wurde gewährleistet, daß auch bei unsymmetrischer Verkrümmung des Prüflings die Kraft genau auf die beiden Einleitungspunkte halbiert wurde und daß sich das Halmstück in allen Punkten frei drehen konnte.

Die Belastung wurde aufgebracht, indem das Zugglied der Presse mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20mm/Min. nach oben fuhr. Die dieser Bewegung entgegenwirkende Kraft (d.h. die auf die Probe einwirkende, äußere Belastung oder Prüfkraft) wurde durch eine im Zugglied der Presse angebrachte Meßdose ständig gemessen und zusammen mit dem gleichmäßig zunehmenden, zurückgelegten Weg des Zuggliedes (Traversenweg) automatisch aufgezeichnet. Aus der Geometrie der Versuchsanlage folgt, daß dieser Weg gleich der mittleren Durchbiegung des Halmstücks in den beiden Lasteinleitungspunkten ist, selbst wenn sich der Metallbalken, an den der Halm gehängt ist, etwas verkantet. Die resultierenden Plots sind daher nichts anderes als das Kraft-Durchbiegungsdiagramm jedes Versuchs. Ein typisches Beispiel einer solchen Aufzeichnung zeigt Fig. 1.9..

3.2. MATERIALGEWINNUNG UND -BEHANDLUNG

Wie bei allen lebenden Pflanzen, so ist auch beim Schilf eine Veränderung seiner Eigenschaften zu erwarten, sobald die Pflanze aus ihrem natürlichen Wuchsort entfernt wird. Durch das Absterben und die dann einsetzenden Abbauvorgänge wird das Gewebe fortlaufend chemisch verändert. Aus der Holztechnologie ist ferner bekannt, daß sämtliche mechanischen Eigenschaften maßgeblich vom Wassergehalt abhängen (vgl. z.B. EMPA 1955).

Für unsere Arbeit, die sich ja für das Verhalten der Pflanze am natürlichen Standort interessiert, stellte sich somit das Problem, die Proben in einem möglichst natürlichen oder zumindest naturnahen Zustande auf die Versuchsanlage zu bringen. Zu diesem Zwecke schnitten wir aus den Halmen etwa 50cm lange Stücke, so daß die durch den Schnitt manchmal verursachte Beschädigung des Halmes mit Sicherheit außerhalb des zu prüfenden (27 cm langen) Abschnittes blieb. Die Blätter entfernten wir außer bei den oberen, dünnen Partien vollständig (Blattspreiten und -scheiden). Die Schnittstellen der Halmstücke verklebten wir sofort mit Plastik-Klebstreifen (Strapex). Danach kamen die Proben in eine mit feuchtem Sägemehl gefüllte Kiste, in welcher sie bis zur Prüfung verblieben. Auf diese Weise konnten wir das Austrocknen mit Sicherheit verhindern, wegen der hohen Feuchtigkeit des Sägemehls ist anzunehmen, daß die Schilfstücke maximal wassergesättigt waren. Zwar bot diese Behandlungsart keine absolute Garantie, daß die geprüften Schilfhalme noch die gleichen Eigenschaften hatten wie im lebenden Zustand. Dafür spielte es keine Rolle, ob die Halme noch am gleichen Tag oder erst sechs bzw. fünfzehn Tage später geprüft wurden (Fig. 3.4.; die dort dargestellten Größen werden im folgenden Kapitel besprochen). Allfällige Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften müßten also, wenn überhaupt, in den ersten paar Stunden nach dem Schnitt stattgefunden haben.



Fig. 3.4. Einfluß des Prüfdatums auf die Festigkeitsparameter ideelle Bruchspannung (links für jedes Prüfdatum), ideelle Grenzspannung (Mitte) und ideeller Elastizitätsmodul (rechts). Entnahme am 13. 7. 77 im "Großen Loch" (vgl. Fig. 3.6.), Prüfung am 13. 7., 19. 7. und 28. 7.

3.3. AUSWERTUNG

Die für das mathematische Modell unentbehrliche Größe ist die Biegesteifigkeit $E \cdot J$ (vgl. Kap. 1.1.). Zur Beurteilung der Ergebnisse der Modellrechnungen muß auch ein Kriterium für das Versagen bekannt sein oder festgelegt werden (Festigkeit, vgl. Kap. 1.2.): Man will wissen, ob die errechneten Beanspruchungen zum Bruch des Halmes führen. Als Vergleichsgrößen haben wir das Bruchmoment M_{Br} und das Grenzmoment M_{Gr} definiert.

Aus den Prüfprotokollen kann unmittelbar herausgelesen werden:

- die Maximallast (Bruchlast F_{Br})
- das Verhältnis Kraftzunahme : Zunahme der Durchbiegung im elastischen Bereich $(dF/d\delta)$
- die Grenzbelastung F_{Gr} .

Die Maximallast wird jeweils sofort an der Maschine abgelesen, die beiden anderen Größen können aus den von der Maschine gezeichneten Plots (vgl. Fig. 1.9.) herausgemessen werden.

Mit diesen Größen und der Geometrie der Versuchsanordnung $(l_a = 10 \text{ cm}, l_b = 7 \text{ cm}; \text{vgl}.$ Fig. 3.1.) kann die Biegesteifigkeit nach Gleichung (1.31) berechnet werden. Um die verschieden dicken Halme besser vergleichen zu können, haben wir für alle Proben das ideelle Trägheitsmoment J_{id} nach (1.24) und daraus den ideellen E-Modul E_{id} nach (1.25) berechnet. Als charakteristischer Durchmesser D wurde der in der (senkrechten) Belastungsebene liegende Durchmesser in der Mitte des belasteten Internodiums (Fig. 3.1.) gewählt. Es wurde die Mitte des Internodiums und nicht etwa der obere Lasteinleitungspunkt für den charakteristischen Durchmesser gewählt, weil der Halmdurchmesser innerhalb eines Internodiums sehr stark aber einigermaßen gesetzmäßig variiert (Fig. 3.5.). Wegen der unterschiedlichen Länge der Internodiums nicht konstant.

Aus der Maximal- bzw. Grenzlast berechneten wir das Bruch- bzw. Grenzmoment mit Gleichung (1.35), analog zum ideellen E-Modul die ideelle Bruchbzw. Grenzspannung ($\sigma_{Br id}$ bzw. $\sigma_{Gr id}$) nach (1.27). Der Druchmesser wurde wie bei der Berechnung des ideellen E-Moduls genommen.

Wie gut oder nicht gut der Einfluß des Durchmessers mit den obigen, ideellen Größen eliminiert werden konnte, zeigen wir bei der Darstellung der Resultate anhand einiger Beispiele.





3.4. RESULTATE

3.4.1. Schilf aus Altenrhein

Am Bodensee-Obersee unterhält das Geobotanische Institut der ETH in Altenrhein SG seit längerer Zeit ein Versuchsfeld (Fig. 3.6.) zum Studium des Schilfrückgangs (KLÖTZLI 1971, 1974; KLÖTZLI und ZÜST 1973a, b; KLÖTZLI und GRÜNIG 1975). Das ganze Gebiet umfaßt knapp einen Kilometer Uferlinie. Der Schwerpunkt unserer Entnahmeflächen lag ungefähr bei km 759,150/262,500 (Landeskoordinaten). Obwohl das Ziel unserer Versuche nicht im Studium der Beziehungen zwischen Standort und mechanischen Parameteren bestand, richteten wir uns in der Wahl der Entnahmeorte nach den von GUNTLI (mdl.) ausgeschiedenen Flächen unterschiedlicher Bewirtschaftung, damit ein späterer Vergleich mit GUNTLIS Ergebnissen bezüglich Histologie und Morphologie des Schilfes möglich bleibt. Die Bezeichnung der einzelnen Flächen stammt ebenfalls aus GUNTLIS Versuchskonzept.

Wir untersuchten Halme aus vier Flächen (vgl. Fig. 3.6.):

- Fläche 1.2: Unbewirtschaftet. Etwa 1 2 m hinter einer nordostexponierten (d.h. auf der Leeseite des Bestandes liegenden), langsam vorrückenden Bestandesfront. Große, kräftige Halme (die das Bild bestimmenden Halme sind etwa 3,6 m lang).
- Fläche 4.1: Gebrannt. Im Innern des Bestandes (mehrere 10 m in jeder Richtung). Länge der voll entwickelten Halme um 3 m.
- Fläche 4.3: Wie 4.1, aber näher bei der seeseitigen Front (ungefähr 10 m von der freien Waserfläche entfernt). Halmgröße ungefähr 3,5 m.
- Fläche 5.1: Geschnitten. Im Innern des Bestandes. Länge der Halme rund 3,3 m.

Die Zeitpunkte (Daten) der Probenahme waren: 13.6., 27.6., 23.7. und 15.8.1979. Am letztgenannten Datum entnahmen wir nur Halme aus den Flächen 4.1 und 1.2, dafür zusätzlich

- Fläche Z: Lockerer Pseudoröhrichtbestand in der Riedwiese "Hüttenrain", einige Meter von der seeseitigen Bewirtschaftungsgrenze entfernt. Relativ oligotroph.
- Fläche G: Einbruchstelle mit starkem Schilfrückgang, einige Meter südwestlich der von KLÖTZLI errichteten Versuchskäfige (KLÖTZLI und ZÜST 1973 b).

Die zusätzlichen Flächen wählten wir, um noch Vergleichswerte eines Bestandes im Molinion und aus einem stark geschädigten Bestand zu erhalten.



Fig. 3.6. Übersichtsplan des Schilffeldes in Altenrhein SG am Bodensee-Obersee mit eingezeichneten Entnahmestellen der Schilfproben (Maßstab ungefähr $\overline{1}$: 3350):

- "Großes Loch Nord": Vorversuche für die Messung von Festigkeit und Steifigkeit, Einfluß des Prüfdatums

- Flächen 1.2, 4.1, 4.3, 5.1, Z und G: Biegeversuche zur Messung von Festigkeit und Steifigkeit

- C_1, C_2 : Messung des Einspanngrades (vgl. Kap. 5.)

Die Sektorenbezeichnung D* stammt aus früheren Versuchen (KLOTZLI und ZUST 1973 a,b).

An den ersten beiden Daten (13. 6. und 27. 6.) untersuchten wir jeweils je 15 Proben aus dem Bereich des (aktuellen) Wasserspiegels sowie je 2 ganze Halme aus jeder Fläche. Die Zahl 15 ist ein Minimalwert, aus Sicherheitsgründen entnahmen wir jeweils einige Exemplare mehr, die wir in der Auswertung mitberücksichtigten. Am 23. 7. und 15. 8. entnahmen wir keine Einzelstücke mehr, sondern jeweils je 6 ganze Halme. Ein ganzer Halm lieferte je nach Länge etwa 4 - 7 Proben (Halmstücke).

Bei der Auswahl der einzelnen Halme berücksichtigten wir vorwiegend die das Bestandesbild prägenden, mittleren bis großen Individuen.

3.4.1.1. Ideeller Elastizitätsmodul

In den Figuren 3.7. - 3.10. sind die ideellen E-Moduli für die vier Entnahmedaten und jede Fläche graphisch dargestellt (Minimum, Mittelwert, Bereich der Standardabweichung), und zwar je für die untersten, zweituntersten und drittuntersten Stücke aus jedem der untersuchten ganzen Halme. Man beachte, daß hier und in allen folgenden Darstellung für den 12. 8. die Werte für die Flächen G und Z anstelle der Flächen 4.3 und 5.1 der übrigen Graphiken eingetragen sind. Aus dem Vergleich der vier Figuren ist sofort die Zunahme des ideellen E-Moduls mit der fortschreitenden (jahreszeitlichen) Entwicklung der Halme zu sehen. Bemerkenswerterweise verläuft die Entwicklung in den unteren Partien nicht gleich wie in den oberen: Am 13. und am 27. 6. ist noch eine deutliche Abnahme des E-Moduls vor allem zwischen den zweit- und drittuntersten Stücken zu beobachten, am 23.7. sind diese Unterschiede verschwunden. Der Grund liegt darin, daß im Frühsommer die Halme noch kürzer sind und darum die drittuntersten Stücke aus der oberen, weicheren Partie des Halmes stammen. Im Laufe des Sommers wandert dieser weichere Teil mit dem fortschreitenden Halmwachstum nach oben und kommt außerhalb des Bereichs der drei untersten Prüfstücke zu liegen (d.h. etwas mehr als 150 cm über Grund).

In der Fläche Z dagegen, wo die Halme auch im ausgewachsenen Zustand bedeutend kürzer bleiben als jene im echten Röhricht der übrigen Flächen, ist die deutliche Abnahme des ideellen E-Moduls vom zweiten zum dritten Stück auch im August noch deutlich ausgeprägt.

Beim Vergleich der Flächen untereinander fällt auf, daß die Fläche 1.2 stets die niedrigsten Werte aufweist. Dies hängt damit zusammen, daß diese Halme die dicksten sind. Da die Biegesteifigkeit nicht ganz zur vierten Potenz des Durchmessers proportional ist, ist der ideelle E-Modul, so wie wir ihn hier definiert haben, nicht unabhängig vom Durchmesser. Die mit zunehmendem Durchmesser abnehmende Tendenz des ideellen E-Moduls ist allerdings nur dann sichtbar, wenn die Einzelwerte aller Flächen in einer Figur aufgetragen werden (Fig. 3.11. - 3.14.). Betrachtet man dagegen in den genannten Darstellungen die Punkte jeder Fläche für sich (zur Verdeutlichung sind die betreffenden Bereiche in den Figuren umrahmt), so ist eine Abnahme des ideellen E-Moduls in Funktion des Durchmessers nur schwach sichtbar (Ausnahmen: Fläche 1.2 am 23.7., Fig. 3.11., und Fläche 4.1). Daraus kann der Schluß gezogen werden, daß auf Standorten größerer Halme die Halmwand im Verhältnis zum Durchmesser dünner ist und/oder ein verhältnismäßig weicheres Gewebe (geringerer E-Modul) gebildet wird. Obwohl die Nährstoffversorgung maßgeblich zur Größe der Halme beiträgt (die nährstoffärmere Fläche Z trägt deutlich die dünnsten und kürzesten Halme), möchten wir hier doch nicht von einem schwächenden Einfluß der Überdüngung reden, da gerade die dicksten Halme (Fläche 1.2) an einem Ort stehen, wo sich der Bestand (wenn auch nur langsam) ausdehnt. Es ist auch zu beachten, daß für die Halme letztlich nicht der (ideelle) Elastizitätsmodul, sondern die effektive Biegesteifigkeit ausschlaggebend ist (vgl. Teil II, Kap. 4.4.2.); ein Blick auf die Tabelle 3.1. zeigt sofort, daß die Halme aus 1.2 die bei weitem höchste Biegesteifigkeit haben.

Die Flächen 4.1, 4.3 und 5.1 unterscheiden sich sowohl durchmessermäßig, als auch im Blick auf den ideellen E-Modul nur wenig voneinander; ein Einfluß der Bewirtschaftung (Flächen 4 gegen 5.1) und der Entfernung von der Bestandesfront (Fläche 4.1 gegen Fläche 4.3) läßt sich jedenfalls nicht nachweisen. Selbst die Fläche G, ein exponierter Standort mit starken Schäden, zeigt hinsichtlich des Elastizitätsmoduls und der Biegesteifigkeit keine Besonderheiten gegenüber der am 12. 8. auch noch untersuchten Fläche 4.1 (Fig. 3.10., Tab. 3.1.). Für die Fläche Z gilt das für die Fläche 1.2 gesagte mit umgekehrten Vorzeichen. Da das Schilf auf diesem hochgelegenen Standort keinem Wellenschlag ausgesetzt ist, sind abweichende morphologische und mechanische Parameter zu erwarten.

Ein anderes Bild zeigen die untersuchten Einzelstücke aus der Höhe des jeweils aktuellen Wasserspiegels (Fig. 3.15. und 3.16.): Obwohl die Unterschiede zwischen den Fläche nicht groß sind, weisen doch in beiden Fällen die Flächen 4.1 und 4.3 die niedrigsten Werte auf, etwas höhere finden sich auf der Fläche 1.2 und die höchsten auf 5.1. Der scheinbare Widerspruch zu den soeben gemachten Feststellungen löst sich auf, wenn wir uns vergegenwärtigen, daß die Wassertiefe bei den einzelnen Flächen verschieden ist.

Da hier für jede Fläche mindestens 15 Proben untersucht wurden, ist der berück-

sichtigte Durchmesserbereich natürlich größer als bei den einzelnen Stücken der geprüften ganzen Halme: der minimale Durchmesser beträgt hier 0,5 - 0,6 cm (vgl. Tab. 3.2. mit Tab. 3.1.). Deshalb erschien es sinnvoll, den ideellen E-Modul mit dem Durchmesser zu korrelieren, um eine allfällige Abhängigkeit festzustellen. Eine solche konnte jedoch nirgends nachgewiesen werden, der maximale Wert für den Korrelationskoeffizienten betrug r = -0,45 (Fläche 4.1 am 13. 6.). Damit scheint sich zu bestätigen, daß innerhalb eines eng begrenzten Standortes der ideelle E-Modul nicht vom Durchmesser abhängig ist (Fig. 3.17., 3.18.).

3.4.1.2. Ideelle Bruchspannung

Mit der Besprechung der ideellen Bruchspannung können wir uns kurz fassen, da analog dasselbe gilt, wie für die ideellen Elastizitätsmoduli. Die bildlichen Darstellungen finden sich in den Figuren 3.19. - 3.22. für Mittel- und Extremwerte sowie Streuungen, in den Figuren 3.23. - 3.26. für den Zusammenhang mit dem Durchmesser, in Fig. 3.27. und 3.28. bzw. 3.29. und 3.30. für die entsprechenden Größen der Einzelproben aus der Höhe der Wasserlinie. In den Tabellen 3.3. und 3.5. sind die entsprechenden Zahlenwerte aufgelistet.

Mit Ausnahme der Fläche Z, welche in den untersten Stücken eine sehr hohe ideelle Bruchspannung aufweist, sind die Unterschiede zwischen den Flächen eher noch geringer als beim ideellen E-Modul. Ebenso ist die ideelle Bruchspannung für Halme aus der gleichen Fläche praktisch gar nicht abhängig vom Halmdurchmesser (Fig. 3.23. - 3.26. und 3.29., 3.30.), wohl aber von der Höhe über Grund.

3.4.1.3. Ideelle Grenzspannung

Die ideelle Grenzspannung ist mit der ideellen Bruchspannung naturgemäß hoch korreliert, das für die Bruchspannung gesagte gilt somit auch für die Grenzspannung (vgl. Fig. 3.31. - 3.34. für Mittelwerte, Extremwerte und Streuungen, Fig. 3.35. - 3.37. für den Zusammenhang mit dem Durchmesser, Fig. 3.39., 3.40. bzw. 3.41., 3.42. für die entsprechenden Größen der Einzelproben aus der Wasserlinie sowie Tab. 3.4. und 3.6. für die Zahlenwerte).

Man beachte, daß die Werte der ideellen Grenzspannung weniger "exakt" sind als jene der Bruchspannung, da der Punkt, wo die Kraft-Verformungslinie von der Geraden abweicht, nicht immer genau lokalisierbar ist (vgl. Fig. 1.9.).

3.4.1.4. Grenzkrümmung

Die Grenzkrümmung ist ein Maß für die Biegsamkeit des Halmes, sie ist die zum Grenzmoment gehörige (lokale) Halmkrümmung. Den entsprechenden Zahlenwert erhält man aus der Division von Grenzmoment M_{Gr} und lokaler Biegesteifigkeit $E \cdot J$ (s. Gl. 1.19). Auch die Grenzkrümmung ist unabhängig vom Durchmesser, wir bringen deshalb hier nur die Figuren für Mittelwerte, Extreme und Streuungen bei den Messungen an den ganzen Halmen (Fig. 3.42. - 3.45.). Zur Interpretation der Werte sei darauf hingewiesen, daß z.B. eine mittlere Grenzkrümmung von 0,005 rad/cm bedeutet, daß ein 30 cm langes Halmstück um 0,005·30 = 0,15 rad = 8,6 ° gebogen werden kann, bis die Grenzbelastung erreicht ist.

Da Biegesteifigkeit und -festigkeit miteinander hoch korrelieren, sind sowohl die Streuungen, wie auch die Unterschiede zwischen den Flächen im allgemeinen kleiner als beim ideellen Elastitzitätsmodul und bei der ideellen Grenzspannung.

Durchmesser [cm]	Ideeller E-Modul [kN/cm2]	EJ [N·cm2]						
Fläche (Bezeichnung gemäl	B Text Kap. 3.4.1.):							
1.2 4.1 4.3 5.1	1.2 4.1 4.3 5.1	1.2 4.1 4.3 5.1						
13. 6. 79			Stk.					
1,03 0,69 0,79 0,71		8944 2797 7667 7722						
1,09 0,82 0,88 0,83 1 14 0 92 1 02 0 99	235 300 430 453	17216 6682 12956 9060	1					
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		6332 2797 3918 5364						
1,01 0,75 0,83 0,82	245 358 327 326	12829 5154 7868 6814	2					
1,03 0,89 0,95 0,96	±105 ±132 ±58 ±81	19325 9806 12146 8724						
0,96 0,65 0,72 0,64		5245 1421 2296 1982						
0,98 0,74 0,83 0,78	133 191 186 151 +26 +57 +12 +00	5919 3236 4712 2071	3					
1,00 0,05 0,96 0,92		0394 0720 7817 2139	Col.					
1 10 0 93 0 96 0 82		31570 17903 21092 14350	SIK.					
1,10 0,93 0,96 0,82	401 522 485 604	32447 19612 21833 15033	1					
1,17 0,94 1,01 0,86	±63 ±39 ±66 ±30	33324 21320 22573 15717	-					
1,05 0,93 0,91 0,85		23670 19179 17083 16383						
1,10 0,95 0,93 0,86	401 497 492 608	28731 19498 17881 16494	2					
1,14 0,96 0,94 0,88	<u><u>14</u> <u>121</u> <u>154</u> <u>146</u></u>	33/91 19819 18678 16605						
1 00 0 91 0 87 0 85	346 346 374 503	11208 11343 7198 11371	3					
1,08 0,91 0,90 0,86	± 27 ± 9 ± 91 ± 38	24805 11425 15056 14532	5					
23. 7. 79			Stk.					
0,83 0,56 0,74 0,61		14942 3494 3246 3184						
1,10 0,84 0,93 0,80	498 743 588 713	37228 23453 25696 17311	1					
1,32 1,18 1,15 0,97	±72 ±65 ±83 ±54	043/0 00990 4/08/ 33089						
0,82 0,57 0,75 0,65 1 06 0 83 0 91 0 81	530 746 636 690	35249 21855 25550 17758	2					
1,27 1,13 1,13 0,99	± 63 ± 49 ± 73 ± 69	64848 47697 47389 35169	2					
0,71 0,54 0,70 0,53		7129 3225 5241 1995						
1,00 0,79 0,86 0,74	532 681 653 667	27672 16765 20580 12686	3					
1,23 1,03 1,10 0,93	$\pm 82 \pm 32 \pm 60 \pm 93$	53778 34668 41581 28062						
Fläche:								
1.2 4.1 G Z	1.2 4.1 G Z	1.2 4.1 G Z						
12. 8. 79	·····	17015 (004 4040 0060	Stk.					
0,89 0,65 0,61 0,57	162 728 671 864	1/015 6984 4943 3268	1					
1.32 1.07 0.99 0.71	± 32 ± 87 $\pm 31 \pm 118$	59769 30067 29110 14658	1					
0.90 0.64 0.61 0.40		17323 6806 5057 1083						
1,11 0,86 0,84 0,57	520 695 779 939	41344 19480 20735 5851	2					
1,25 1,06 1,00 0,66	±56 ±78 ±49 ±76	62411 30568 30750 9977						
0,86 0,59 0,59 0,39	575 601 795 600	16861 5200 4729 482	2					
1,05 0,81 0,79 0,55	$\pm 52 \pm 118 \pm 28 \pm 78$	52936 22225 24327 5757	3					

Tab. 3.1. Durchmesser (Minimum, Mittel, Maximum), ideeller Elastizitätsmodul (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts) und Biegesteifigkeit *E*·J (Minimum, Mittel, Maximum) der an der EMPA geprüften Abschnitte ganzer Halme aus Altenrhein. Stk. (Stück): Bezeichnung der Position innerhalb des Halms, von unten nach oben

Tab. 3.2. Durchmesser (Minimum, Mittel, Maximum), ideeller Elastizitätsmodul (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts) und Biegesteifigkeit $E \cdot J$ (Minimum, Mittel, Maximum) der an der EMPA geprüften Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie aus Altenrhein. r: Korrelationskoeffizient zum Durchmesser

Durchmesser [cm]	Ideeller E-Modul [kN/cm2]; r	EJ [N·cm2]			
Fläche (Bezeichnung gen	äß Text Kap. 3.4.1.):				
1.2 4.1 4.3 5.1	1.2 4.1 4.3 5.1	1.2 4.1 4.3 5.1			
13. 6. 79					
0,64 0,50 0,67 0,51	288 280 263 392	1777 702 2114 970			
0,91 0,74 0,87 0,80	± 18 ± 49 ± 13 ± 25	11513 4216 8727 9323			
1,26 0,94 1,14 0,99	r= 0,00 -0,45 0,23 0,29	25830 9266 25338 18496			
27. 6. 79					
0,60 0,61 0,50 0,44	360 343 352 427	1913 1458 798 574			
0,86 0,76 0,85 0,73	± 24 ± 22 ± 21 ± 24	11721 6067 11163 7495			
1,10 0,97 1,18 0,96	r=0,04 -0,07 0,34 0,13	29554 13052 25864 16400			

Tab. 3.3. Durchmesser (Minimum, Mittel, Maximum), ideelle Bruchspannung (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts) und Bruchmoment M_{Br} (Minimum, Mittel, Maximum) der an der EMPA geprüften Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie aus Altenrhein. r: Korrelationskoeffizient zum Durchmesser

Durchmesser [cm]			Ideelle Bruchsp. [N/cm2]; r				Bruchmoment [N·cm]				
Fläche (Bezeichnung gemä			3 Text Kap. 3.4.1.):								
1.2	4.1	4.3	5.1	1.2	4.1	4.3	5.1	1.2	4.1	4.3	5.1
13. 6.	79										
0,64	0,50	0,67	0,51	1092	765	961	1474	16	5	23	13
0,91	0,74	0,87	0,80	±65	±68	±45	±82	91	35	69	82
1,26	0,94	1,14	0,99	r= 0,17	0,49	0,34	0,33	181	75	178	139
27. 6.	79										
0,60	0,61	0,50	0,44	1288	1221	1199	1399	21	21	8	5
0,86	0,76	0,85	0,73	±73	±59	±71	±95	92	55	85	64
1,10	0,97	1,18	0,96	r=0,33	0,17	0,64	0,52	195	108	187	126

Tab. 3.4. Durchmesser (Minimum, Mittel, Maximum), ideelle Grenzspannung (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts) und Grenzmoment M_{Gr} (Minimum, Mittel, Maximum) der an der EMPA geprüften Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie aus Altenrhein. r: Korrelationskoeffizient zum Durchmesser

Durchmesser [cm]	Ideelle	e Grenzsp. [N/cm2]; r			Grenzmoment [N·cm]			
Fläche (Bezeichnung gemä	B Text Kap. 3.4.1.):							
1.2 4.1 4.3 5.1	1.2	4.1	4.3	5.1	1.2	4.1	4.3	5.1
13. 6. 79								
0,64 0,50 0,67 0,51	409	184	380	568	2	1	6	4
0,91 0,74 0,87 0,80	±46	±25	±34	±50	36	8	28	32
1,26 0,94 1,14 0,99	r= 0,30	0,34	0,33	0,27	99	21	86	59
27. 6. 79								
0,60 0,61 0,50 0,44	537	376	438	499	6	3	2	2
0,86 0,76 0,85 0,73	±57	±42	±54	±70	43	18	33	24
1,10 0,97 1,18 0,96	r=0,70	0,52	0,63	0,41	115	54	80	51

Tab. 3.5. Durchmesser (Minimum, Mittel, Maximum), ideelle Bruchspannung (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts) und Bruchmoment M_{Br} (Minimum, Mittel, Maximum) der an der EMPA geprüften Abschnitte ganzer Halme aus Altenrhein. Stk (Stück): Bezeichnung der Position innerhalb des Halms, von unten nach oben

Durchmesser [cm] Ideelle Bruchsp. [N/cm2] Bruchmoment [N·cm] Fläche (Bezeichnung gemäß Text Kap. 3.4.1.): 1.2 4.1 4.3 5.1 1.2 4.1 4.3 5.1 1.2 4.1 4.3 5.1 13. 6. 79 Stk. 1,03 0,69 0,79 0,71 1,09 0,82 0,88 0,83 1276 1578 2024 1997 1,14 0,92 1,02 0,99 ±285 ±394 ±239 ±560 0,98 0,67 0,76 0,69 1,01 0,75 0,83 0,82 1065 1365 1161 1290 1,03 0,89 0,95 0,96 ±261 ±401 ±194 ±241 0,96 0,65 0,72 0,64 0,98 0,74 0,83 0,78 904 648 605 885 1,00 0,83 0,98 0,92 $\pm 2 \pm 238 \pm 81 \pm 304$ 27. 6. 79 Stk. 1,10 0,93 0,96 0,82 1,14 0,94 0,98 0,84 1971 2299 2043 2447 $\pm 150 \pm 154 \pm 312 \pm 639$ 1,17 0,94 1,01 0,86 1,05 0,93 0,91 0,85 1,10 0,95 0,93 0,86 1666 1886 1796 2611 ±179 ±27 ±198 ±97 1,14 0,96 0,94 0,88 0,92 0,90 0,85 0,84 1,00 0,91 0,87 0,85 1169 1217 1310 1907 1,08 0,91 0,90 0,86 $\pm 211 \pm 30 \pm 253 \pm 354$ 23. 7. 79 Stk. 0,83 0,56 0,74 0,61 1,10 0,84 0,93 0,80 2790 3640 2980 3401 1,32 1,18 1,15 0,97 ±361 ±256 ±367 ±286 0,82 0,57 0,75 0.63 1,06 0,83 0,91 0,81 2582 3108 2990 2814 1,27 1,13 1,13 0,99 ±254 ±83 ±335 ±279 0,71 0,54 0,70 0,53 1,00 0,79 0,86 0,74 2192 2361 2722 2380 1,23 1,03 1,10 0,93 ± 257 ± 51 ± 296 ± 294 Fläche: 1.2 4.1 G Ζ 1.2 4.1 G Ζ 1.2 4.1 Ζ G 12.8.79 Stk. 0,89 0,65 0,61 0,57 1,15 0,86 0,86 0,65 3176 4103 4433 5917 1,32 1,07 0,99 0,71 ±235±356±188±300 0,90 0,64 0,61 0,40 1,11 0,86 0,84 0,57 2873 3179 3900 4384 $\pm 330 \pm 300 \pm 155 \pm 166$ 1,25 1,06 1,00 0,66 0.86 0.59 0.59 0.39 1,05 0,81 0,79 0,53 2523 2646 3258 2915 1,15 1,02 0,93 0,67 ±272±394 ±92±195

Derland Internal	Hadle Comment Diferral	Comment Di and			
Durchmesser [cm]	Ideelle Grenzsp. [N/cm2] Grenzmoment [N·cm]				
Fläche (Bezeichnung gemäl	3 Text Kap. 3.4.1.):				
1.2 4.1 4.3 5.1	10 11 10 51	10 11 10 51	0.1		
13. 6. 79	1.2 4.1 4.3 5.1	1.2 4.1 4.3 5.1	Stk.		
1,05 0,09 0,79 0,71	652 475 868 771	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1		
1,14 0,92 1,02 0,99	±232±194±132±197	129 53 115 51	-		
0,98 0,67 0,76 0,69		26 5 9 18	1963		
1,01 0,75 0,83 0,82	418 375 356 434	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	2		
1,05 0,69 0,95 0,96	<u>1141 1130 177 192</u>	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$			
0.98 0.74 0.83 0.78	177 182 182 207	13 3 4 0 17 8 12 7 17	3		
1,00 0,83 0,98 0,92	±26 ±53 ±37 ±133	20 16 21 9	_		
27. 6. 79			Stk.		
1,10 0,93 0,96 0,82		153 108 104 91			
1,14 0,94 0,98 0,84	1087 1432 1175 1689	156 115 108 100	1		
1,17 0,94 1,01 0,80	180 180 1137 128	100 123 113 109			
1,10 0,95 0,91 0,85	810 1100 988 1457	103 90 73 90 104 91 78 92	2		
1,14 0,96 0,94 0,88	±92 ±64 ±80 ±46	105 93 80 94	_		
0,92 0,90 0,85 0,84		25 16 18 33			
1,00 0,91 0,87 0,85	544 354 538 860	59 26 37 53 04 25 56 72	3		
1,08 0,91 0,90 0,80	1217 H155 H240 H501	94 33 36 73	Cale		
23. 7. 79		71 34 14 13	SIK.		
1.10 0.84 0.93 0.80	1454 2291 1615 1853	207 161 149 112	1		
1,32 1,18 1,15 0,97	$\pm 255 \pm 133 \pm 271 \pm 133$	465 338 300 218			
0,82 0,57 0,75 0,63		74 35 24 20			
	1578 1983 1752 1675	200 128 155 103	2		
0,71 0,54 0,70 0,53	1243 187 1273 1213	403 233 308 204			
1.00 0.79 0.86 0.74	1363 1450 1639 1213	146 82 122 60	3		
1,23 1,03 1,10 0,93	±220 ±36 ±218 ±267	303 158 290 135			
Fläche:					
1.2 4.1 G Z	1.2 4.1 G Z	1.2 4.1 G Z			
12. 8. 79			Stk.		
0,89 0,65 0,61 0,57		96 59 50 63			
1,15 0,86 0,86 0,65	1823 2487 2489 3110	296 165 169 85	1		
	±214±215±155±255	425 258 273 110			
0,90 0,04 0,01 0,40	1791 1888 2289 1995	1/4 45 40 13 408 122 140 39	2		
1,25 1,06 1,00 0,66	$\pm 261 \pm 185 \pm 135 \pm 106$	611 180 204 57	~		
0,86 0,59 0,59 0,39		86 32 30 7			
1,05 0,81 0,79 0,53	1602 1357 1541 1235	188 69 80 19	3		
1.15 1.02 0.93 0.67	$\pm 166 \pm 268 \pm 205 \pm 128$	280 139 143 31			

Tab. 3.6. Durchmesser (Minimum, Mittel, Maximum), ideelle Grenzspannung (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts) und Grenzmoment M_{Gr} (Minimum, Mittel, Maximum) der an der EMPA geprüften Abschnitte **ganzer Halme** aus Altenrhein. Stk (Stück): Bezeichnung der Position innerhalb des Halms, von unten nach oben











































Fig. 3.17. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 13. 6. 79.



Fig. 3.18. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 27. 6. 79.















Fig. 3.22. Ideelle Bruchspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 12. 8. 79. Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.


























Fig. 3.29. Ideelle Bruchspannung der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 13. 6. 79.



Fig. 3.30. Ideelle Bruchspannung der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 27. 6. 79.











































Fig. 3.41. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 13. 6. 79.



Fig. 3.42. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 27. 6. 79.



Fig. 3.43. Grenzkrümmung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 13. 6. 79. Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.













3.4.2. Schilf aus Othfresen

In Othfresen (BRD, Gemeinde Liebenburg, Kreis Goslar) ist seit 1974 eine biologische Abwasserreinigungsanlage, basierend auf dem Prinzip der "limnischen Entsorgung durch aktive Wurzelräume" (KICKUTH 1977), in Betrieb (UTz 1978, CARDENAS 1978). Entscheidend bei diesem Verfahren ist die Fähigkeit bestimmter Sumpf- und Uferpflanzen, nicht nur ihre unterirdischen Organe (Rhizome und Wurzeln), sondern auch noch den umgebenden Boden mit Sauerstoff zu versorgen. Dadurch entsteht ein Mosaik aerober und anaerober Bereiche im Wurzelraum. Dies schafft die mikrobiellen Voraussetzungen für einen sehr weitgehenden Abbau der Schadstoffe im Abwasser (KICKUTH 1975-1979). Das Entsorgungsprojekt Othfresen ist das erste seiner Art und wurde in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Ökochemie des Instituts für Bodenkunde der Universiät Göttingen (unter R. Kickuth) entwickelt. Das Gelände, früher ein verlandeter, ehemaliger Klärteich einer Erzgrube, ist zum größten Teil von (genetisch sehr wahrscheinlich einheitlichem) Schilf überwachsen und bot uns die Gelegenheit, Halme einheitlicher Herkunft, aber unterschiedlicher Nährstoffbelastung zu gewinnen. Da das vom Abwasser beeinflußte Gebiet eine Ausdehnung von nur etwa 150 auf 300 m hat und eine maximale Höhendifferenz von rund einem Meter aufweist, können die übrigen Standortsfaktoren als homogen angenommen werden.

Am 7. Oktober 1980 entnahmen wir aus sechs verschiedenen Orten je gut 20 Halme zur Prüfung. Die Verteilung dieser von 0 bis 5 numerierten Flächen ist aus dem Situationsplan (Fig. 3.47.) ersichtlich.

- Flächen 0 und 1 liegen im unbelasteten Teil des Geländes, d.h. die Gehalte an Stickstoff und Phosphor sind niedriger als 10 g N/m³, bzw. 1 g P/m³.
- Fläche 2 liegt im "kontaminierten" Bereich, das ist jenes Gebiet, welches am Abbau beteiligt ist. Der Nährstoffgehalt beträgt hier noch mehr als 10 g N/m³, bzw. 1 g P/m³.
- Flächen 3 und 4 liegen in der Randzone des "hoch belasteten" Bereichs, d.h. das Abwasser ist noch nicht vollständig eingesickert. Der Stickstoffgehalt liegt über 25 g N/m³, jener an Phosphor über 5 g P/m³.
- Fläche 5 liegt unmittelbar beim Abwassereinlauf. Die mittlere Belastung des Abwassers beträgt 77,5 g N/m³ und 15,3 g P/m³.

Die frisch entnommenen Halme sind in Fig. 3.48. abgebildet, die Längen derselben sind in Fig. 3.49. graphisch dargestellt. Es zeigt sich, daß die Halme mit abnehmender Nährstoffbelastung länger werden (Fläche 4, am hydraulisch oberen



Fig. 3.47. Situationsplan der Kläranlage Othfresen mit eingezeichneten Entnahmeorten für die Schilfproben.

- 416 -



Fig. 3.48. Zur Biegeprüfung geerntete Schilfhalme in Othfresen. Jedes Bündel entstammt einer der Flächen 0 bis 5 (von links nach rechts). In der Schwarzweiß-Reproduktion nicht mehr sehr deutlich sichtbar ist der erhöhte Anteil an bereits vergilbten Blättern bei den stark belasteten Halmen der Flächen 3 bis 5. Die Größe der abgebildeten Person beträgt rund 1,60 m.

Rand der belasteten Zone gelegen ist weniger stark belastet als Fläche 3). Der höhere Anteil bereits vergilbter Blätter bei den Flächen mit höheren Nährstoffkonzentrationen in Boden und Wasser war in der Natur deutlich sichtbar, ist jedoch in der Schwarzweißreproduktion nicht zu erkennen. Die Durchmesser (vgl. Tab. 3.7. sowie Fig. 4.3. und 4.4.) zeigen die gleiche Tendenz wie die Halmlängen. Diese Feststellungen scheinen im Widerspruch zu stehen mit den Beobachtungen, wonach an überdüngten Seen die Schilfpflanzen größer werden. Es ist jedoch zu bedenken, daß auf dem ganzen Schilfbestand des Klärwerks Othfresen höhere Nährstoffgehalte anzutreffen sind als in einem durchschnittlichen Schweizersee. Die Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen sind hier so hoch, daß sich offenbar jede Zunahme stark schädigend auswirkt und zu geringeren Abmessungen der Individuen führt. Ganz deutlich sichtbar wird dies bei den sehr kurzen Halmen der Fläche 5, welche ja unmittelbar dem ungereinigten Abwasser ausgesetzt sind (Stickstoff: 77,5 mg/l, Phosphor 15,3 mg/l[!]).





3.4.2.1. Ideeller Elastizitätsmodul

Die Figuren 3.50., 3.52. und 3.53. zeigen die Resultate graphisch, die Zahlenwerte von E-Modul und Biegesteifigkeit $E \cdot J$ sind in der Tabelle 3.7. zusammengestellt.

Vergleicht man mit den Resultaten aus Altenrhein vom 12. 8. 79 (Tab. 3.1.), so erkennt man, daß die Werte dort (mit Ausnahme der Fläche Z) von sehr ähnlicher Größenordnung sind wie jene aus Othfresen (Mittelwerte von rund 500 - 800 kN/cm^2). Ausgeprägter als in Altenrhein zeigt sich hier die zunehmende Tendenz des ideellen Elastizitätsmoduls von unten nach oben. In den Flächen 0 bis 2 nimmt auch die Biegesteifigkeit nach oben zu. Für die Flächen 3 bis 5 mit ihren kleineren Halmen gilt das Umgekehrte, da dort der Durchmesser in den unteren 1 1/2 m stärker abnimmt.

Im Gegensatz zum Schilf aus Altenrhein ist bei den Halmen aus Othfresen der ideelle E-Modul ziemlich stark abhängig vom Durchmesser, wie aus den hohen Korrelationskoeffizienten (Tab. 3.7.) hervorgeht.

Bei der Beurteilung der Unterschiede zwischen den einzelnen Entnahmeorten müssen deshalb außer den Mittelwerten, Streuungen usw. (Fig. 3.50.) auch die in Funktion des Durchmessers aufgetragenen Einzelwerte betrachtet werden (Fig. 3.52. und 3.53.). Der Übersichtlichkeit wegen werden einerseits die Flächen 0, 1 und 5, andererseits die Flächen 2, 3 und 4 je in einem separaten Graphen dargestellt. Es zeigt sich, daß in den Flächen 0, 1 und 2 bei gleicher Dicke die E-Moduli höher und in den Flächen 3, 4 und 5 niedriger sind. Bei den zweituntersten Stücken nehmen die Werte der Fläche 4 eine Zwischenstellung ein. Daraus kann mit einiger Vorsicht geschlossen werden, daß sich die Hypertrophierung erniedrigend auf den ideellen E-Modul auswirkt. Beim Vergleich mit Altenrhein ist zu beachten, daß auch die am wenigsten belasteten Flächen 0 und 1 im Wasser immer noch ein Mehrfaches an Stickstoff und Phosphor aufweisen als selbst die Bucht in Altenrhein (Werte für den Bodensee-Obersee nach WAGNER 1970, zit. nach GRÜ-NIG 1975: Gesamtstickstoff: rund 1 mg/l, Gesamtphosphor: 0,038 mg/l).

3.4.2.2. Ideelle Bruchspannung

Die Mittelwerte der ideellen Bruchspannung (Tab. 3.7., Fig. 3.51.) liegen mit der Größenordnung von 3000 - 4000 N/cm² im gleichen Bereich wie die entsprechenden Zahlen für die Flächen 1.2 und 4.1 in Altenrhein am 12. August. Im Gegensatz zum Elastizitätsmodul nimmt die ideelle Bruchspannung innerhalb der Halme von unten nach oben ab (außer in den Flächen 3 und 4, wo die Werte fast gleich bleiben). Wie der Vergleich der Figur 3.51. mit 3.50. sofort zeigt, besteht zwischen den Flächen die selbe Tendenz wie beim ideellen E-Modul. Bei der auch hier notwendigen Betrachtung der Einzelstücke (Fig. 3.54. und 3.55.) zeigen sich ebenfalls sehr ähnliche Verhältnisse wie beim Elastizitätsmodul: Die Flächen 0, 1 und 2 bilden eine Grupe mit relativ höheren Werten, die Flächen 3 und 5 eine solche mit tieferen, die Fläche 4 liegt dazwischen. Dies gilt sowohl bei den untersten, wie auch bei den zweituntersten Stücken. Das zum ideellen E-Modul gesagte gilt daher analog auch für die ideelle Bruchspannung.

3.4.2.3. Ideelle Grenzspannung

Die in Tab. 3.7. und Fig. 3.56. angegebenen Mittelwerte der ideellen Grenzspannung der Othfreser Halme liegen in der Größenordnung von 1400 - 2000 N/cm² und entsprechen damit etwa jenen der Fläche 1.2 in Altenrhein am 12. August. Die übrigen Bodensee-Halme weisen zumindest in ihren untersten Stücken bedeutend höhere Werte auf (rund 2500 N/cm² in den Flächen 4.1 und G). Auch die Grenzspannung nimmt von unten nach oben ab; bei den Flächen 3 und 4 liefern die zweituntersten Stücke die niedrigsten Werte.

Bezüglich der Einzelwerte (Fig. 3.58. und 3.59.) und der Verhältnisse zwischen den Flächen gilt dasselbe wie für die ideelle Bruchspannung. Auffällig sind die größeren Streuungen bei den untersten Stücken der Flächen 2 und 5, die das Bild etwas verunklaren.

3.4.2.4. Grenzkrümmung

Bei der Grenzkrümmung (Fig. 3.57., bzw. 3.60. und 3.61.) stimmen die Werte wieder ungefähr mit jenen aus Altenrhein vom 12. August überein (mit Ausnahme der Fläche Z). Für die untersten Stücke finden wir einen Bereich von 0,08 - 0,05 rad/cm gegenüber 0,07 - 0,09 rad/cm in Altenrhein.

Aus den Figuren 3.60. und 3.61. ist zu sehen, daß die Grenzkrümmung bedeutend weniger stark vom Durchmesser abhängt als E-Modul und Bruch- bzw. Grenzspannung. Auch zwischen den Flächen sind die Unterschiede geringer. Bei den untersten Stücken, für welche in der Einzeldarstellung Unterschiede noch einigermaßen sichtbar sind, zeigen die Flächen 0, 1 und 2 höhere, die Flächen 3, 4 und 5 niedrigere Werte. Besonders niedrige Grenzkrümmungen besitzt ein Teil der Halme aus den Flächen 2 und 3. Es scheint daher, daß die äußerst hohe Nährstoffbelastung in der Nähe des Einlaufbauwerks in den untersten Halmabschnitten die Biegsamkeit reduziert. Bei den zweituntersten Stücken überlagern sich die Bereiche derartig, daß kaum mehr von signifikanten Unterschieden zwischen den einzelnen Flächen gesprochen werden kann. Der Grund liegt zum Teil darin, daß sich Grenzspannung und E-Modul gleichsinnig verhalten, so daß die Division der beiden Größen zur Berechnung der Grenzkrümmung die Unterschiede zum größeren Teil verschwinden läßt.

Tab. 3.7. Durchmesser, Biegesteifigkeit E·J, Bruch- und Grenzmoment (Minimum, Mittel, Maximum), ideeller Elastizitätsmodul, ideelle Bruch- und Grenzspannung (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts) der an der EMPA geprüften Halmstücke aus Othfresen. Stk (Stück): Bezeichnung der Position innerhalb des Halms, von unten nach oben

r: Korrelationskoeffizient zum Durchmesser

Fläche (Bezeichnung gemäß Text Kap. 3.4.2.):												
0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	
Durch	n]									Stk.		
0,66	0,53	0,54	0,55	0,50	0,53							
0,81	0,75	0,72	0,68	0,70	0,64							1
1,23	0,95	0,94	0,94	0,92	0,90							
0,70	0,54	0,53	0,51	0,48	0,49							
0,82	0,75	0,71	0,65	0,66	0,58							2
1,09	0,97	0,89	0,95	0,89	0,74							
0,62	0,48	0,59	0,45	0,38	-							
0,77	0,70	0,70	0,61	0,55	-							3
0,95	0,85	0,78	0,85	0,71		1						
Ideell	/cm2]	; r	EJ [N	·cm2]					Stk.			
574	604	606	510	594	648	4981	2897	2993	2207	2361	2815	
±37	±33	±42	±34	±30	±36	12179	9934	8231	5197	7213	5396	1
r=-,77	-0,73	-0,62	-0,69	-0,62	-0,71	29391	17647	16714	11407	14582	10885	
601	668	671	570	687	653	7824	3162	3048	1574	1985	1898	
±38	±41	±40	±45	±31	±52	12508	10549	8833	4743	6796	3848	2
r=-,90	-0,45	-0.55	-0,68	-0,56	-0,55	19042	15922	17972	8897	14118	9075	
659	718	758	641	779		5248	1807	5740	1609	888		
±41	±34	±64	±60	±25		10729	9082	8985	4290	4069		3
r=-,78	-0,27	-0,89	-0,94	-0.11		20614	16168	13776	7808	9508		
Ideell	g [N/0	cm2]; r	Bruch	Bruchmoment [N·cm]								
3550	3707	3672	2706	3255	3282	88	48	59	35	43	44	
±164	±151	±200	±168	±120	±183	188	162	141	83	113	86	1
r=-,69	-0,29	-0,32	-0,41	-0,29	-0,45	396	259	266	145	207	154	
3083	3232	3055	2586	3154	2509	100	48	46	23	28	28	
±126	±143	±183	±155	±117	±171	165	139	114	69	94	51	2
r=-,73	-0,40	-0,18	-0,54	-0,17	-0,21	255	216	258	117	179	108	
2986	2986	3075	2668	3191		78	31	77	25	18		
±148	±127	±219	±219	±100		129	106	104	58	58		3
r=-,72	0,09	-0,82	-0,85	0,46		204	174	151	104	120		
Ideelle Grenzspannung [N/cm2]; r						Grenzmoment [N·cm]						Stk.
2032	2081	1960	1456	1875	1991	49	30	10	9	26	24	
±108	±112	±181	±130	±73	±127	108	89	73	45	65	51	1
r=-,55	-0,36	-0,29	-0,24	-0,23	-0,52	223	144	163	100	130	96	
1919	1926	1827	1452	1971	1424	65	29	24	13	21	17	
±107	±92	±136	±104	±89	±141	99	83	68	38	58	28	2
r=-,83	-0,40	-0,18	-0,49	-0,29	-0,45	153	125	157	76	101	71	
1874	1921	1796	1615	1986		49	17	40	11	11		100
±118	±95	±235	±161	±70		79	68	59	35	36		3
r=-,74	0,03	-0,71	-0,67	0,55		139	104	84	63	75		











Fig. 3.52. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, **unterste Stücke.** Flächen 0, 1 und 5






Fig. 3.53. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5































Fig. 3.58. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, unterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5



Fig. 3.58. (Fortsetzung) Flächen 2, 3 und 4



Fig. 3.59. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5







Fig. 3.60. Grenzkrümmung der Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, unterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5



Fig. 3.60. (Fortsetzung) Flächen 2, 3 und 4



Fig. 3.61. Grenzkrümmung der Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5



Fig. 3.61. (Fortsetzung) Flächen 2, 3 und 4