

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

Herausgeber: Geobotanisches Institut, Stiftung Rübel (Zürich)

Band: 101 (1989)

Artikel: Mechanische Belastbarkeit natürlicher Schilfbestände durch Wellen, Wind und Treibzeug = Mechanical impacts on natural reed stands by wind, waves and drift

Autor: Binz-Reist, Hans-Rudolf

Kapitel: Teil III. Untersuchungen zur Halmfestigkeit : Laborversuche an der EMPA

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-308911>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 31.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://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

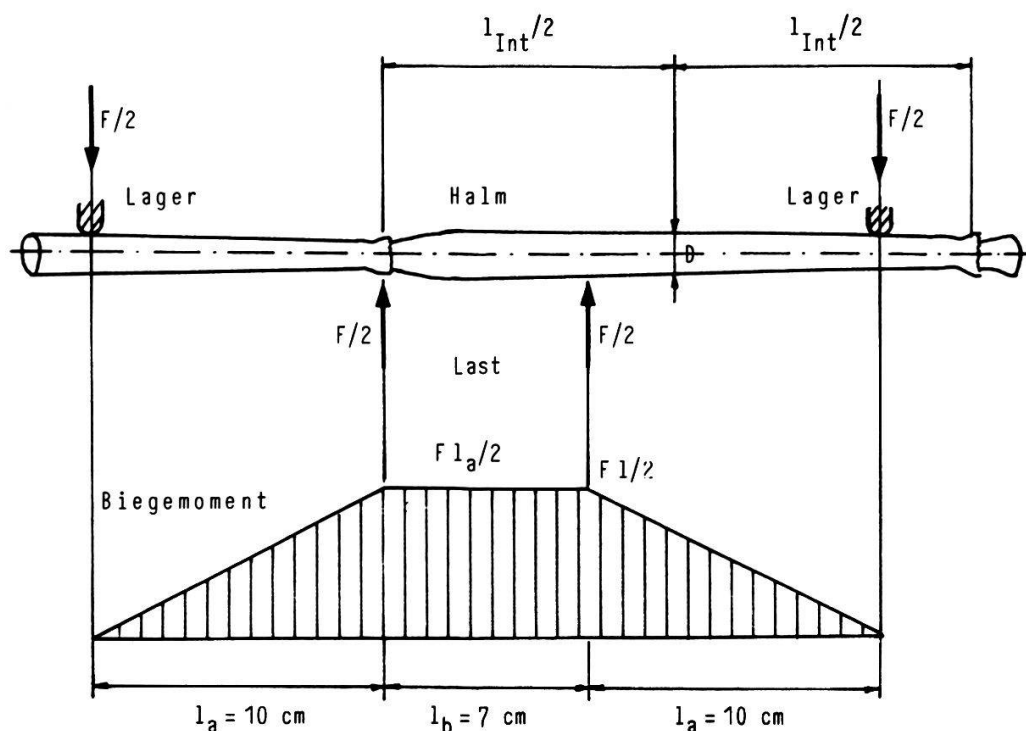


Fig. 3.1. Schematische Darstellung der Prüfungseinrichtung für die Laborversuche an der EMPA. Da bei der Prüfmaschine die Belastung nach oben geht, steht die Situation verglichen mit dem System der Figur 1.7. auf dem Kopf.

F = Last D = für das geprüfte Schilfstück 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 Biegebruchs, "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 Schilfhalmern nie mehr als 4 cm vom Knoten entfernt war, ermöglichte uns, die noch in BINZ und KLÖTZLI (1978) angegebene Länge l_b des Mittelfeldes von 10 cm auf 7 cm 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

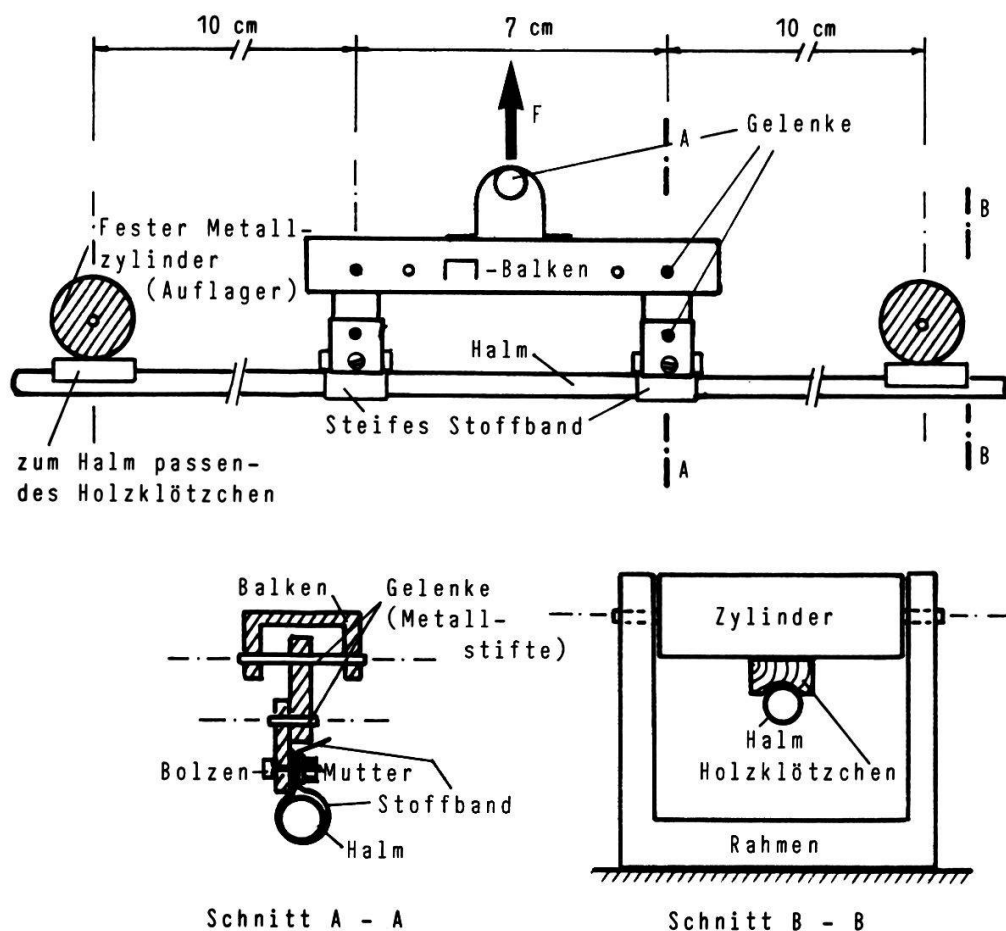


Fig. 3.2. Prüfeinrichtung für Festigkeitsmessungen an Schilf im Labor an der EMPA (vgl. auch Fig. 3.3.)

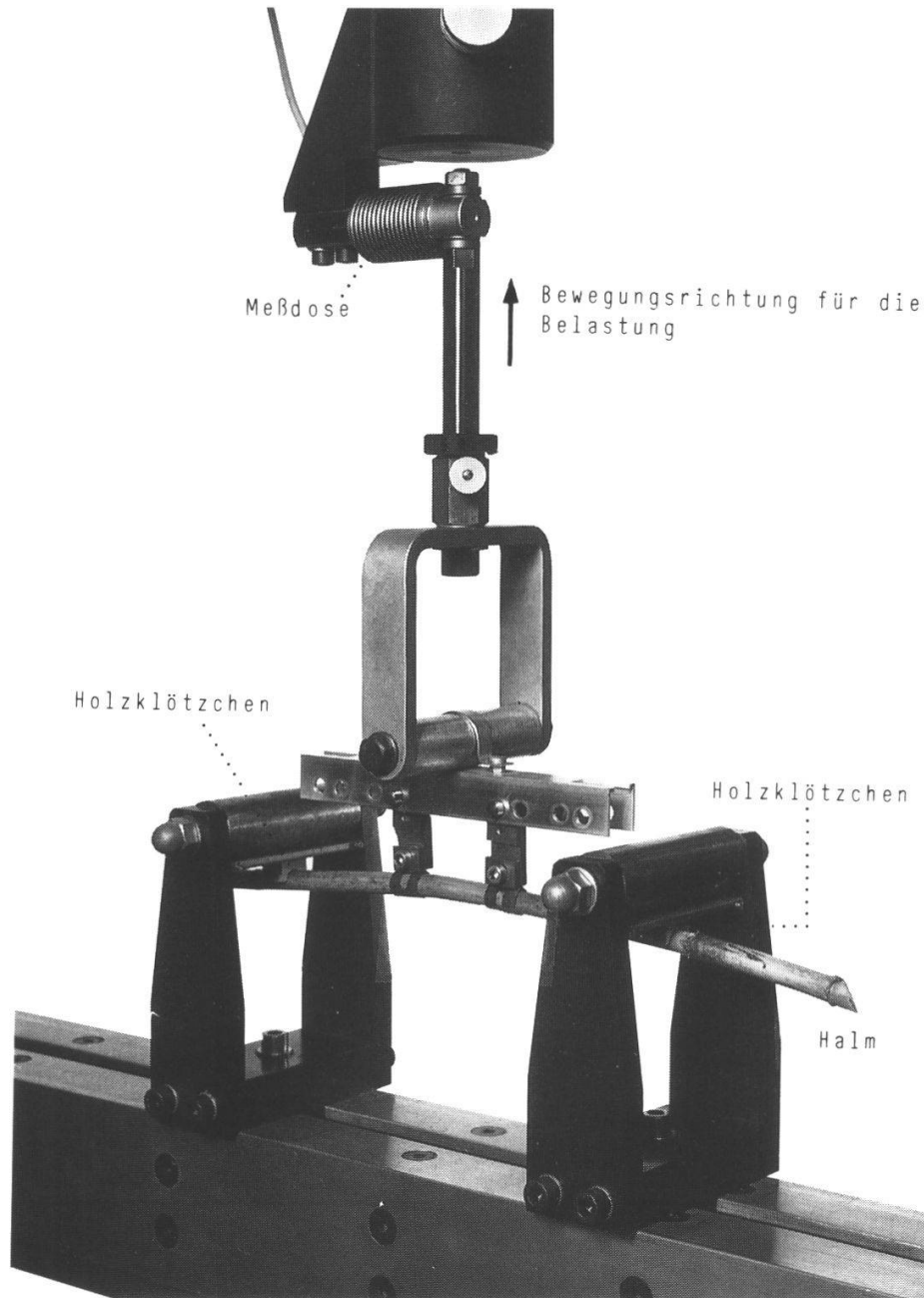


Fig. 3.3. Photo der in Fig. 3.2. schematisch dargestellten Prüfungseinrichtung für Schilfhalm an der EMPA. Die Metallplatten zwischen den Auflagezylindern und den auf dem Halm aufliegenden Holzklötzchen erwiesen sich als überflüssig und wurden später weggelassen.

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 (27cm 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 mußten also, wenn überhaupt, in den ersten paar Stunden nach dem Schnitt stattgefunden haben.

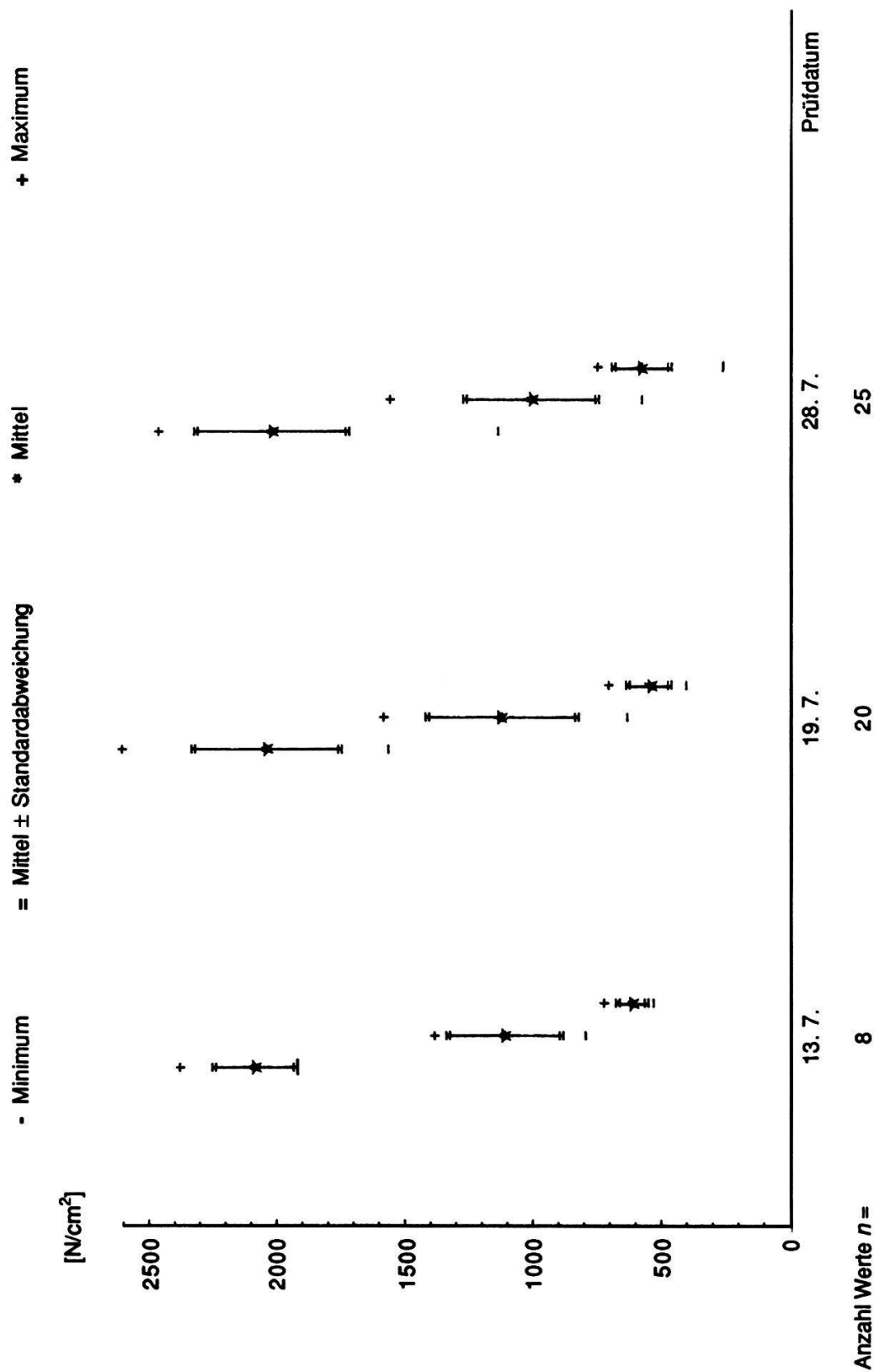


Fig. 3.4. Einfluß des Prüfdatums auf die Festigkeitsparameter ideale Bruchspannung (links für jedes Prüfdatum), ideale Grenzspannung (Mitte) und ideeller Elastizitätsmodul (rechts).
Entnahme am 13. 7. 77 im "Großen Loch" (vgl. Fig. 3.6.), Prüfung am 13. 7., 19. 7. und 28. 7.

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 ($l_a = 10$ cm, $l_b = 7$ cm; 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 Internodien ist die relative Position des oberen Lasteinleitungspunktes innerhalb eines 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 Bruch- bzw. Grenzspannung ($\sigma_{Br id}$ bzw. $\sigma_{Gr id}$) nach (1.27). Der Durchmesser 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.

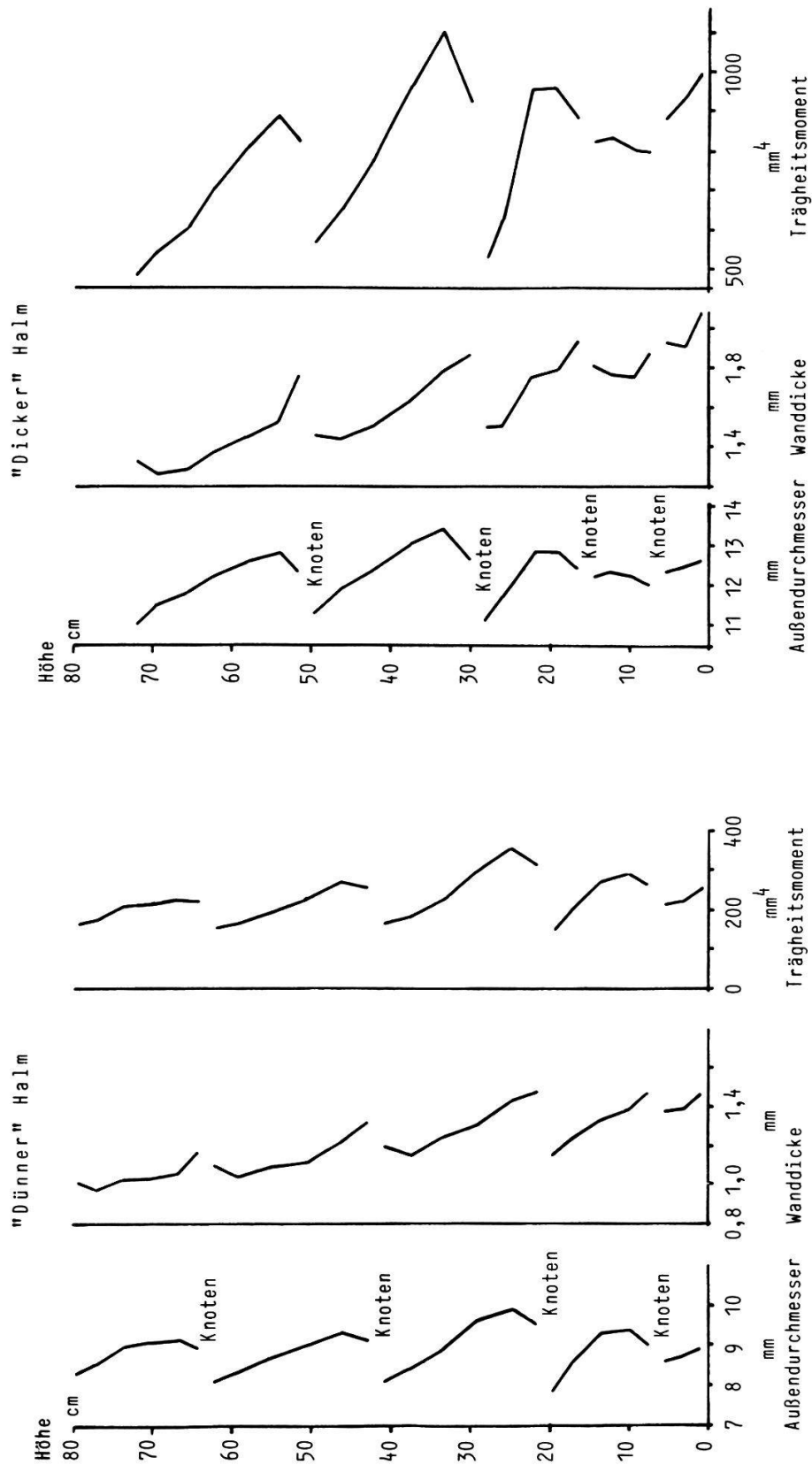


Fig. 3.5. Verlauf von Durchmesser D , Wanddicke t und Trägheitsmoment J entlang den ersten fünf Internodien je eines "dünnen" (links) bzw. "dicken" Schilfhalmes (rechts). Höhe gemessen ab erstem Knoten. (Messung EMPA)

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 Parametern bestand, richteten wir uns in der Wahl der Entnahmeorte nach den von GUNTLI (mdl.) ausgeschiedenen Flächen unterschiedlicher Bewirtschaftung, damit ein späterer Vergleich mit GUNTLI's Ergebnissen bezüglich Histologie und Morphologie des Schilfes möglich bleibt. Die Bezeichnung der einzelnen Flächen stammt ebenfalls aus GUNTLI's 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 Wasserfläche 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.

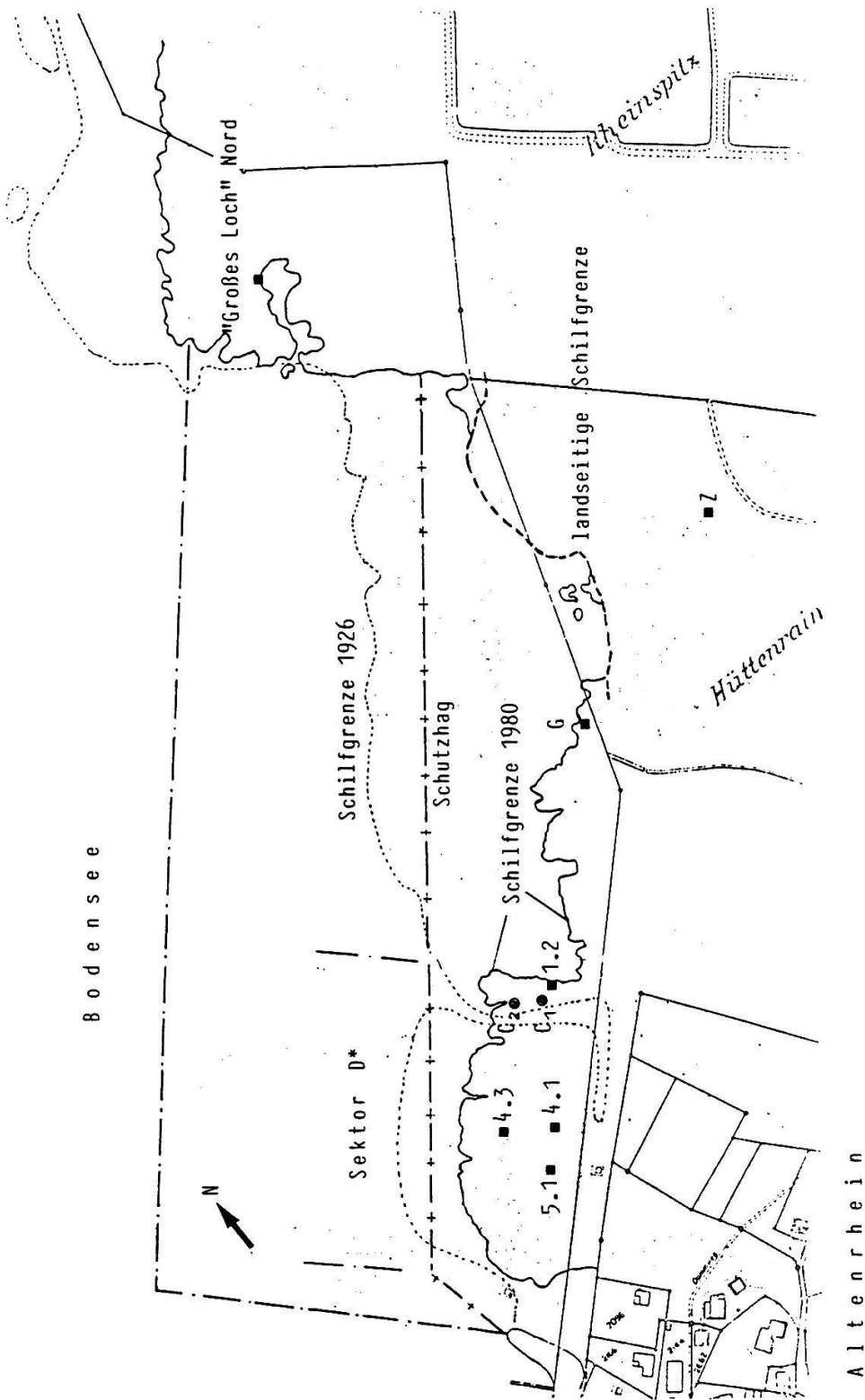


Fig. 3.6. Übersichtsplan des Schilffeldes in Altenrhein SG am Bodensee-Obersee mit eingezeichneten Entnahmestellen der Schilfproben (Maßstab ungefähr 1 : 3350):

- "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
- C₁, C₂: Messung des Einspanngrades (vgl. Kap. 5.)

Die Sektorenbezeichnung D* stammt aus früheren Versuchen (KLÖTZLI und ZÜST 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 ha-

ben, 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 weiches 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 Halm-durchmesser (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 $0,005 \cdot 30 = 0,15 \text{ rad} = 8,6^\circ$ 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 Elastizitätsmodul und bei der ideellen Grenzspannung.

Tab. 3.1. Durchmesser (Minimum, Mittel, Maximum), ideeller Elastizitätsmodul (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts) und Biegesteifigkeit EJ (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]				Ideeller E-Modul [kN/cm ²]				EJ [N·cm ²]				
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					8944	2797	7667	7722	1
1,09	0,82	0,88	0,83	235	300	430	453	17216	6682	12956	9060	
1,14	0,92	1,02	0,99	±73	±77	±46	±142	25488	11155	19663	11463	
0,98	0,67	0,76	0,69					6332	2797	3918	5364	2
1,01	0,75	0,83	0,82	245	358	327	326	12829	5154	7868	6814	
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	3
0,98	0,74	0,83	0,78	133	191	186	151	5919	3236	4712	2071	
1,00	0,83	0,98	0,92	±26	±57	±12	±90	6594	6720	7817	2159	
27. 6. 79												Stk.
1,10	0,93	0,96	0,82					31570	17903	21092	14350	1
1,14	0,94	0,98	0,84	401	522	485	604	32447	19612	21833	15033	
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	2
1,10	0,95	0,93	0,86	401	497	492	608	28731	19498	17881	16494	
1,14	0,96	0,94	0,88	±4	±21	±54	±46	33791	19819	18678	16605	
0,92	0,90	0,85	0,84					11208	11343	7198	11371	3
1,00	0,91	0,87	0,85	346	346	374	503	18006	11384	11127	12952	
1,08	0,91	0,90	0,86	±27	±9	±91	±38	24805	11425	15056	14532	
23. 7. 79												Stk.
0,83	0,56	0,74	0,61					14942	3494	3246	3184	1
1,10	0,84	0,93	0,80	498	743	588	713	37228	23453	25696	17311	
1,32	1,18	1,15	0,97	±72	±65	±83	±54	64370	56990	47687	33589	
0,82	0,57	0,75	0,63					11378	3838	4831	3506	2
1,06	0,83	0,91	0,81	530	746	636	690	35249	21855	25550	17758	
1,27	1,13	1,13	0,99	±63	±49	±73	±69	64848	47697	47389	35169	
0,71	0,54	0,70	0,53					7129	3225	5241	1995	3
1,00	0,79	0,86	0,74	532	681	653	667	27672	16765	20580	12686	
1,23	1,03	1,10	0,93	±82	±32	±60	±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												Stk.
0,89	0,65	0,61	0,57					17015	6984	4943	3268	1
1,15	0,86	0,86	0,65	462	728	671	864	41811	20283	19792	8193	
1,32	1,07	0,99	0,71	±32	±87	±31	±118	59769	30067	29110	14658	
0,90	0,64	0,61	0,40					17323	6806	5057	1083	2
1,11	0,86	0,84	0,57	520	695	779	939	41344	19480	20735	5851	
1,25	1,06	1,00	0,66	±56	±78	±49	±76	62411	30568	30750	9977	
0,86	0,59	0,59	0,39					16861	5200	4729	482	3
1,05	0,81	0,79	0,53	575	691	785	622	35168	13592	16438	2925	
1,15	1,02	0,93	0,67	±52	±118	±28	±78	52936	22225	24327	5757	

Tab. 3.2. Durchmesser (Minimum, Mittel, Maximum), ideeller Elastizitätsmodul (Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts) und Biegesteifigkeit EJ (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/cm ²]; r				EJ [N·cm ²]			
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											
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/cm ²]; r				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											
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 Grenzsp. [N/cm ²]; r				Grenzmoment [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											
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/cm ²]				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					106	38	79	88	1
1,09	0,82	0,88	0,83	1276	1578	2024	1997	167	86	140	100	
1,14	0,92	1,02	0,99	±285	±394	±239	±560	227	144	207	114	
0,98	0,67	0,76	0,69					74	33	34	57	2
1,01	0,75	0,83	0,82	1065	1365	1161	1290	108	55	69	67	
1,03	0,89	0,95	0,96	±261	±401	±194	±241	142	94	110	82	
0,96	0,65	0,72	0,64					53	20	27	25	3
0,98	0,74	0,83	0,78	605	885	904	648	56	39	55	25	
1,00	0,83	0,98	0,92	±2	±238	±81	±304	59	74	88	26	
27. 6. 79												Stk.
1,10	0,93	0,96	0,82					238	171	173	115	1
1,14	0,94	0,98	0,84	1971	2299	2043	2447	288	185	188	142	
1,17	0,94	1,01	0,86	±150	±154	±312	±639	337	199	202	170	
1,05	0,93	0,91	0,85					169	152	132	151	2
1,10	0,95	0,93	0,86	1666	1886	1796	2611	219	157	141	165	
1,14	0,96	0,94	0,88	±179	±27	±198	±97	270	162	150	180	
0,92	0,90	0,85	0,84					73	88	63	90	3
1,00	0,91	0,87	0,85	1169	1217	1310	1907	122	89	88	116	
1,08	0,91	0,90	0,86	±211	±30	±253	±354	170	89	112	141	
23. 7. 79												Stk.
0,83	0,56	0,74	0,61					133	53	48	50	1
1,10	0,84	0,93	0,80	2790	3640	2980	3401	401	257	271	196	
1,32	1,18	1,15	0,97	±361	±256	±367	±286	755	526	508	370	
0,82	0,57	0,75	0,63					122	54	65	41	2
1,06	0,83	0,91	0,81	2582	3108	2990	2814	324	203	256	170	
1,27	1,13	1,13	0,99	±254	±83	±335	±279	596	399	481	317	
0,71	0,54	0,70	0,53					67	35	60	27	3
1,00	0,79	0,86	0,74	2192	2361	2722	2380	231	136	197	112	
1,23	1,03	1,10	0,93	±257	±51	±296	±294	440	255	433	224	
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					204	119	88	105	1
1,15	0,86	0,86	0,65	3176	4103	4433	5917	509	263	296	164	
1,32	1,07	0,99	0,71	±235	±356	±188	±300	735	390	410	233	
0,90	0,64	0,61	0,40					174	86	85	25	2
1,11	0,86	0,84	0,57	2873	3179	3900	4384	408	201	238	88	
1,25	1,06	1,00	0,66	±330	±300	±155	±166	611	280	320	128	
0,86	0,59	0,59	0,39					150	61	63	13	3
1,05	0,81	0,79	0,53	2523	2646	3258	2915	295	130	167	48	
1,15	1,02	0,93	0,67	±272	±394	±92	±195	466	204	224	84	

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

Durchmesser [cm]				Ideelle Grenzsp. [N/cm ²]				Grenzmoment [N-cm]				
Fläche (Bezeichnung gemäß Text Kap. 3.4.1.):												
1.2	4.1	4.3	5.1									
13. 6. 79				1.2	4.1	4.3	5.1	1.2	4.1	4.3	5.1	Stk.
1,03	0,69	0,79	0,71					45	7	35	33	1
1,09	0,82	0,88	0,83	652	475	868	771	87	26	64	40	
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	2
1,01	0,75	0,83	0,82	418	375	356	434	43	15	22	22	
1,03	0,89	0,95	0,96	±141	±156	±77	±92	60	31	38	28	
0,96	0,65	0,72	0,64					13	3	4	6	3
0,98	0,74	0,83	0,78	177	182	182	207	17	8	12	7	
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
1,14	0,94	0,98	0,84	1087	1432	1175	1689	156	115	108	100	
1,17	0,94	1,01	0,86	±80	±80	±137	±28	160	123	113	109	
1,05	0,93	0,91	0,85					103	90	75	90	2
1,10	0,95	0,93	0,86	810	1100	988	1457	104	91	78	92	
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	3
1,00	0,91	0,87	0,85	544	354	538	860	59	26	37	53	
1,08	0,91	0,90	0,86	±217	±135	±246	±301	94	35	56	73	
23. 7. 79												Stk.
0,83	0,56	0,74	0,61					71	34	14	13	1
1,10	0,84	0,93	0,80	1454	2291	1615	1853	207	161	149	112	
1,32	1,18	1,15	0,97	±255	±133	±271	±133	465	338	300	218	
0,82	0,57	0,75	0,63					74	35	24	20	2
1,06	0,83	0,91	0,81	1578	1983	1752	1675	200	128	155	103	
1,27	1,13	1,13	0,99	±243	±87	±273	±213	405	253	308	204	
0,71	0,54	0,70	0,53					35	24	34	9	3
1,00	0,79	0,86	0,74	1363	1450	1639	1213	146	82	122	60	
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
1,15	0,86	0,86	0,65	1823	2487	2489	3110	296	165	169	85	
1,32	1,07	0,99	0,71	±214	±215	±155	±235	425	258	273	110	
0,90	0,64	0,61	0,40					174	45	46	13	2
1,11	0,86	0,84	0,57	1791	1888	2289	1995	408	122	140	39	
1,25	1,06	1,00	0,66	±261	±185	±135	±106	611	180	204	57	
0,86	0,59	0,59	0,39					86	32	30	7	3
1,05	0,81	0,79	0,53	1602	1357	1541	1235	188	69	80	19	
1,15	1,02	0,93	0,67	±166	±268	±205	±128	280	139	143	31	

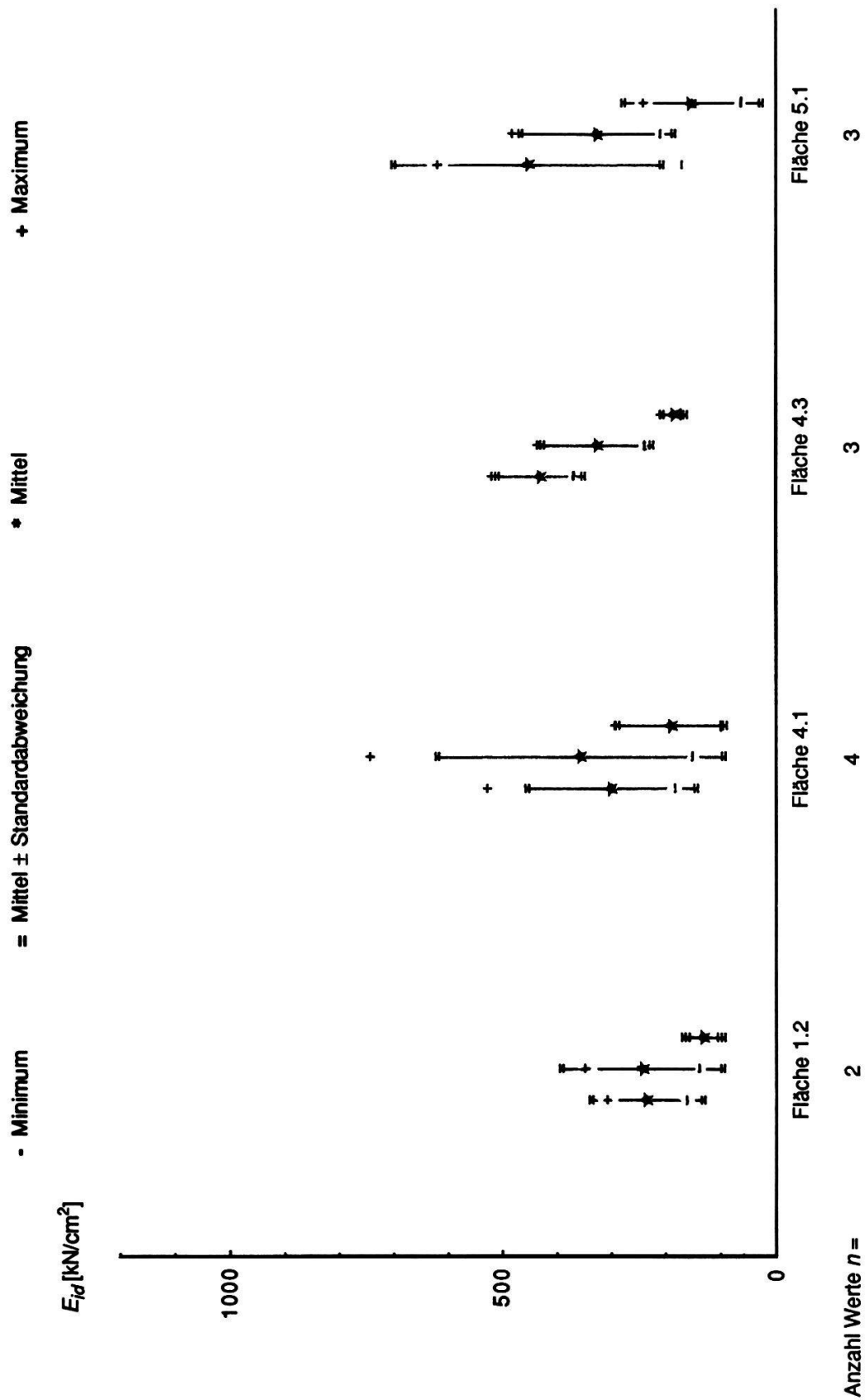


Fig. 3.7. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenheim vom 13. 6. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

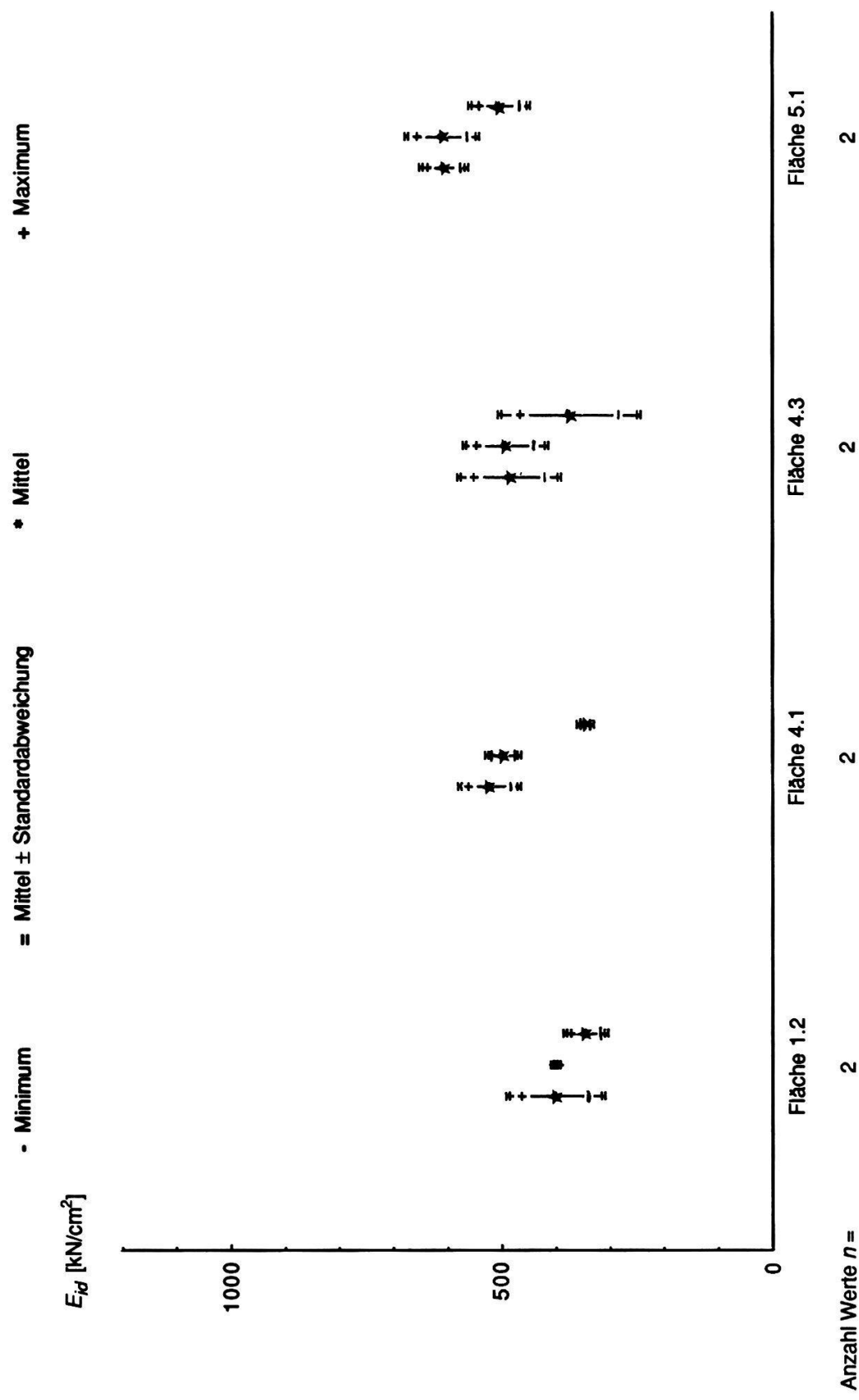


Fig. 3.8. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 27. 6. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

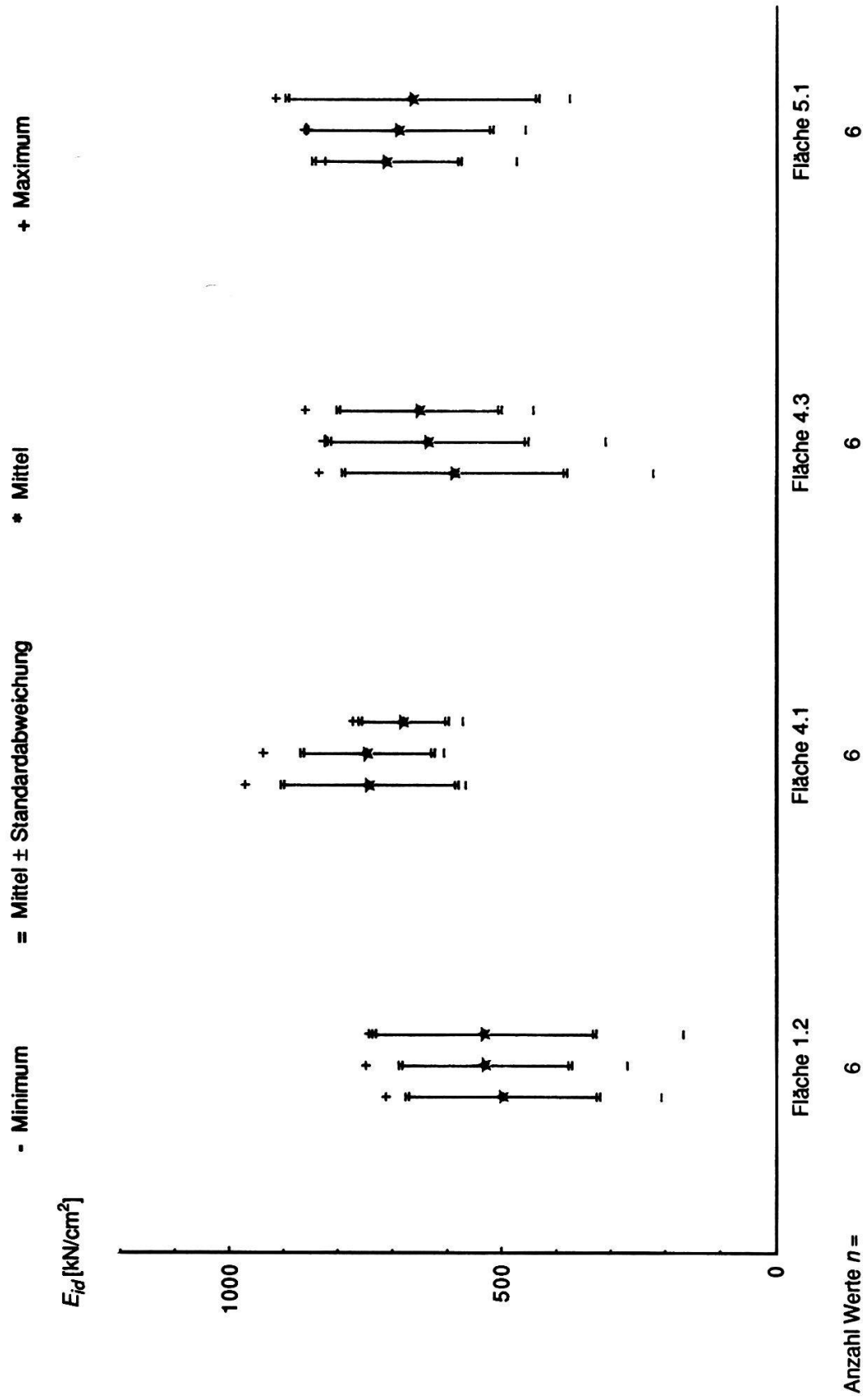


Fig. 3.9. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 23. 7. 79. Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

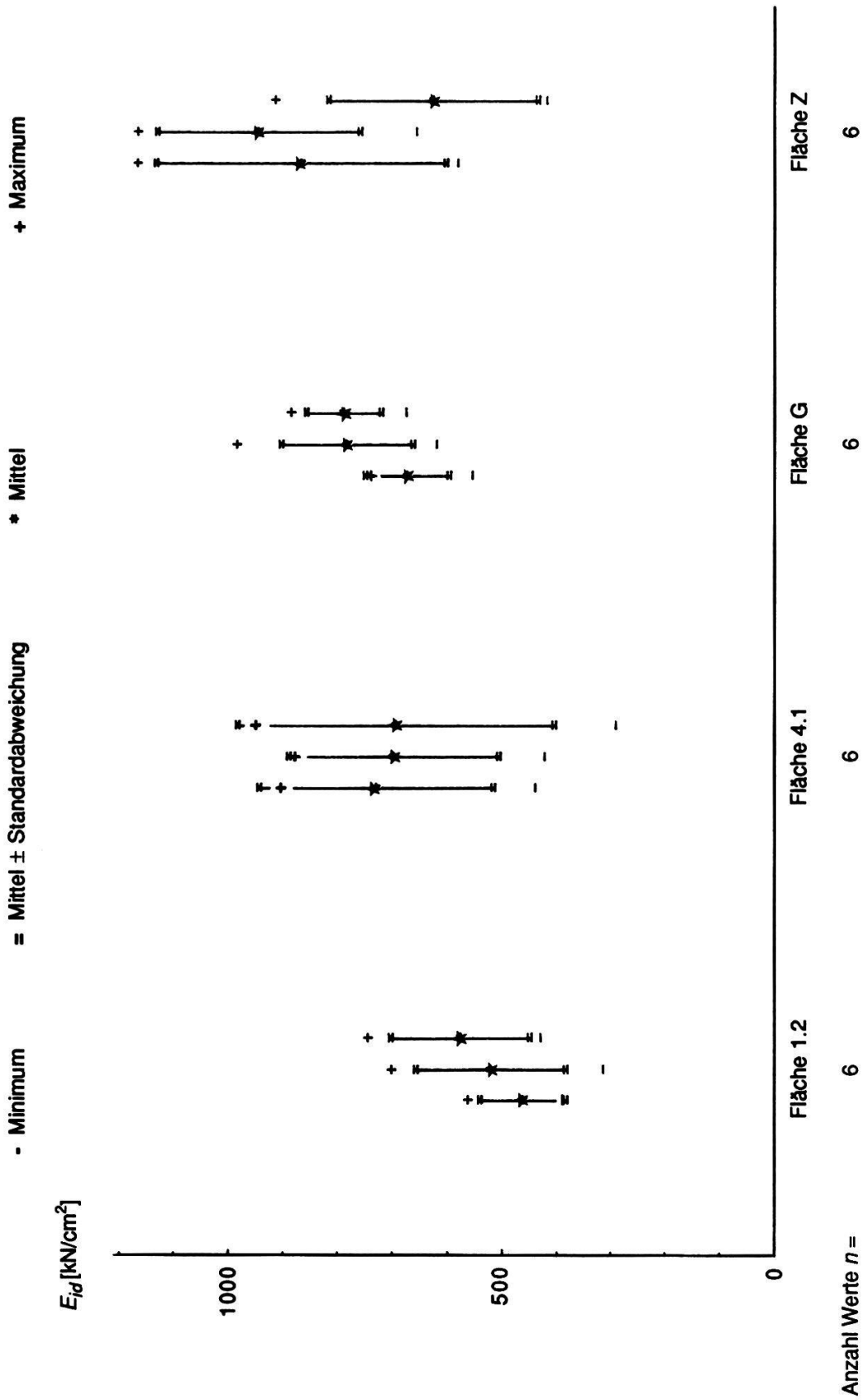


Fig. 3.10. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 12. 8. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

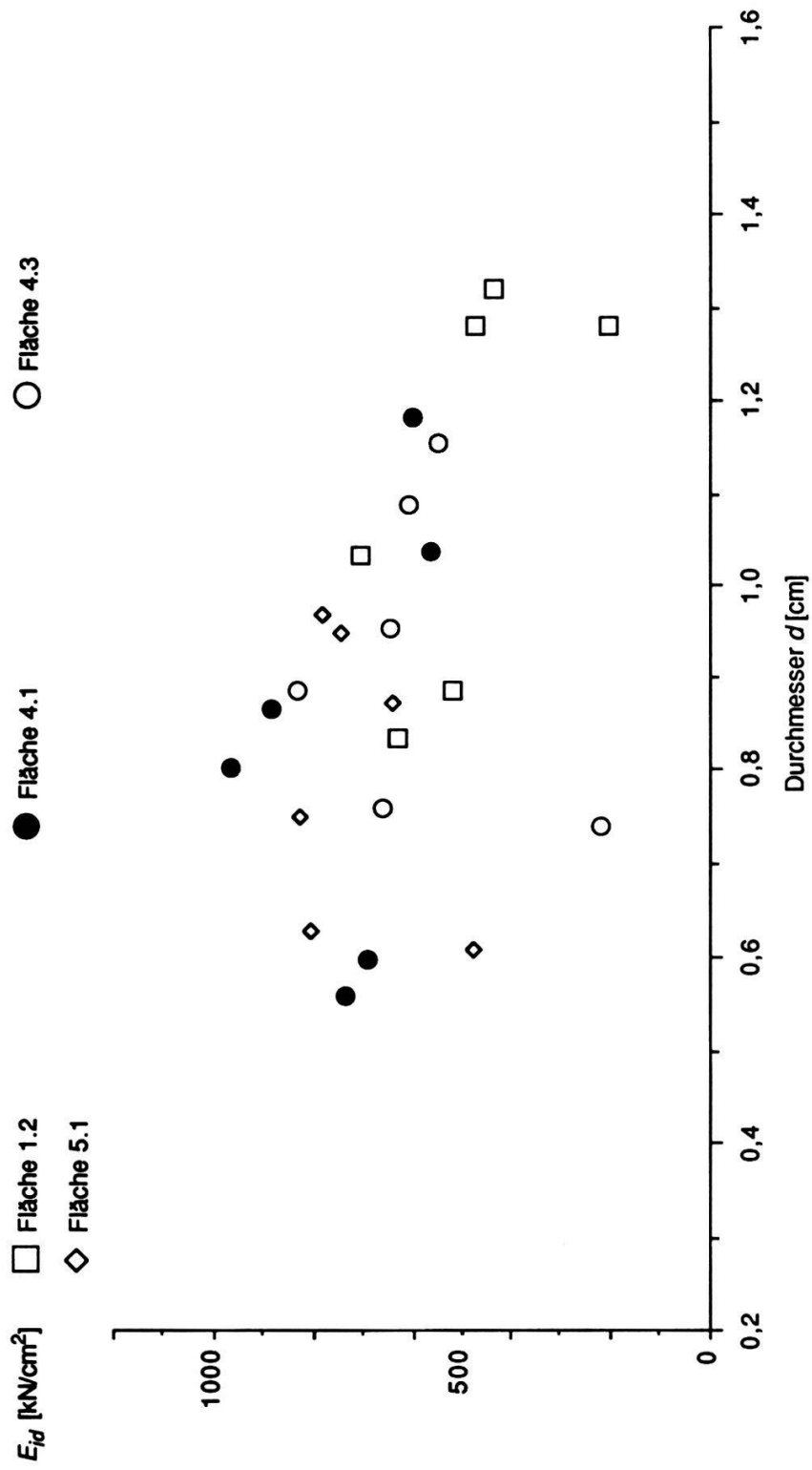


Fig. 3.11. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers, unterste Stücke vom 23. 7. 79.

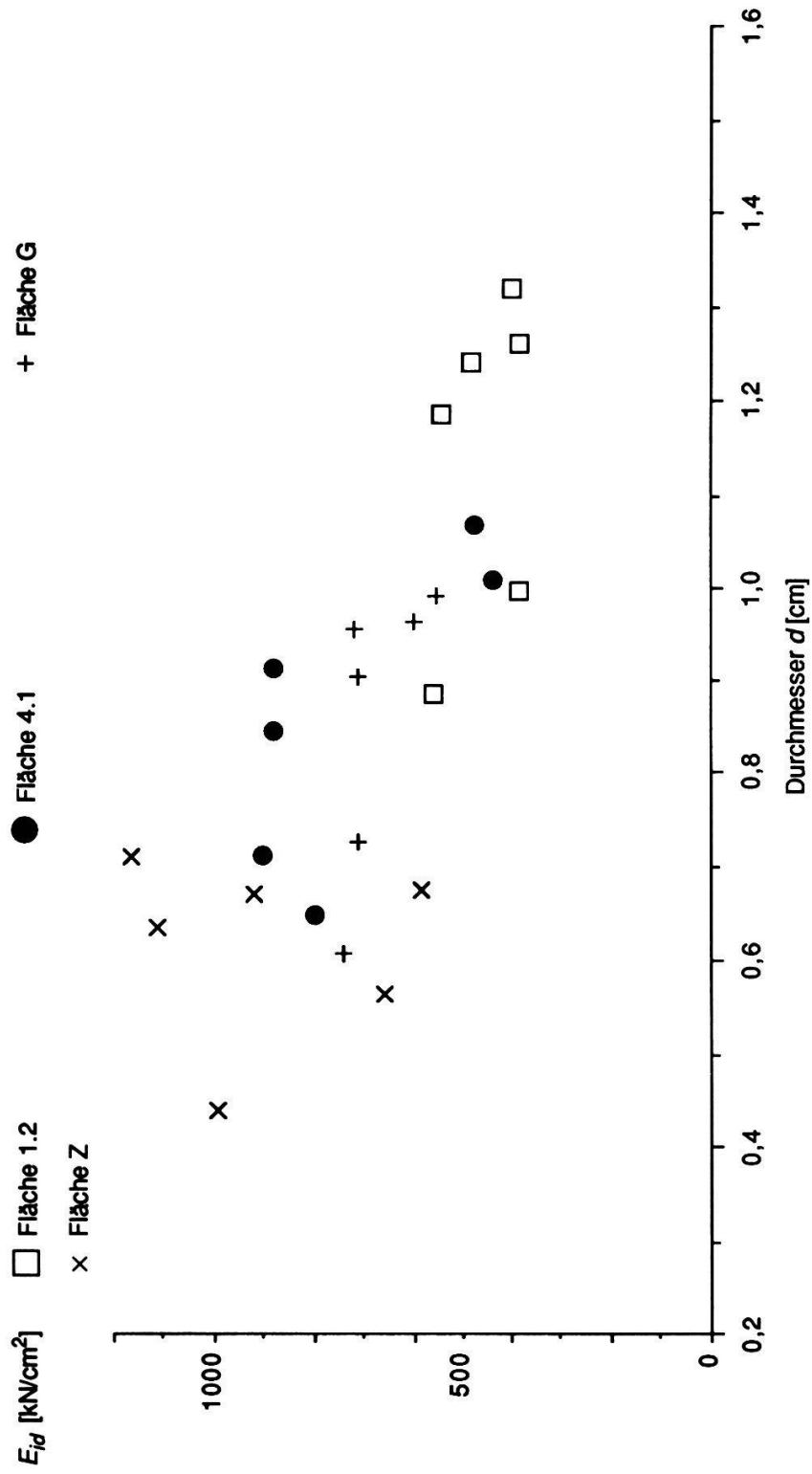


Fig. 3.12. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenher in Funktion des Durchmessers, unterste Stücke vom 12. 8. 79.

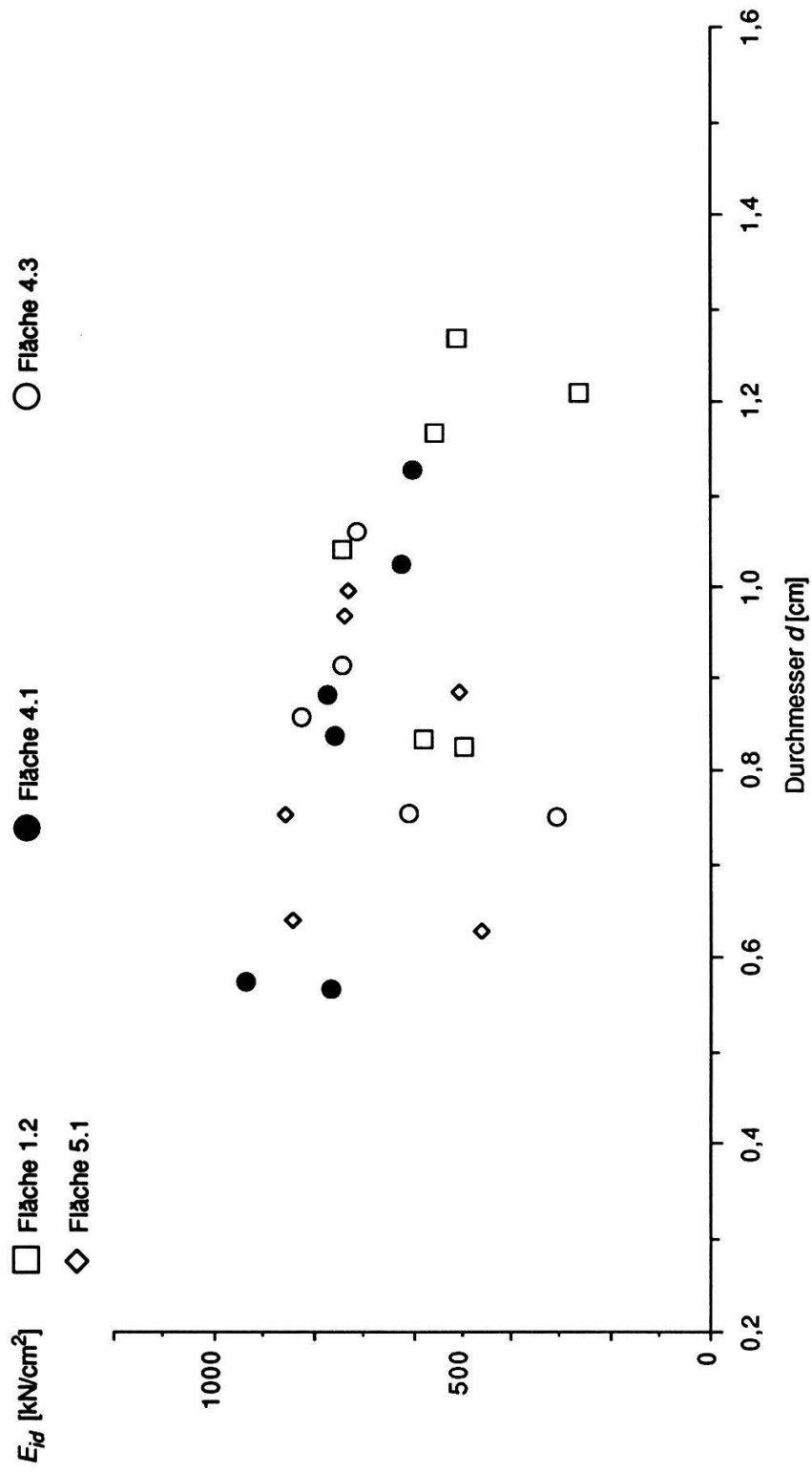


Fig. 3.13. Ideeller E-Modul der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke vom 23. 7. 79.

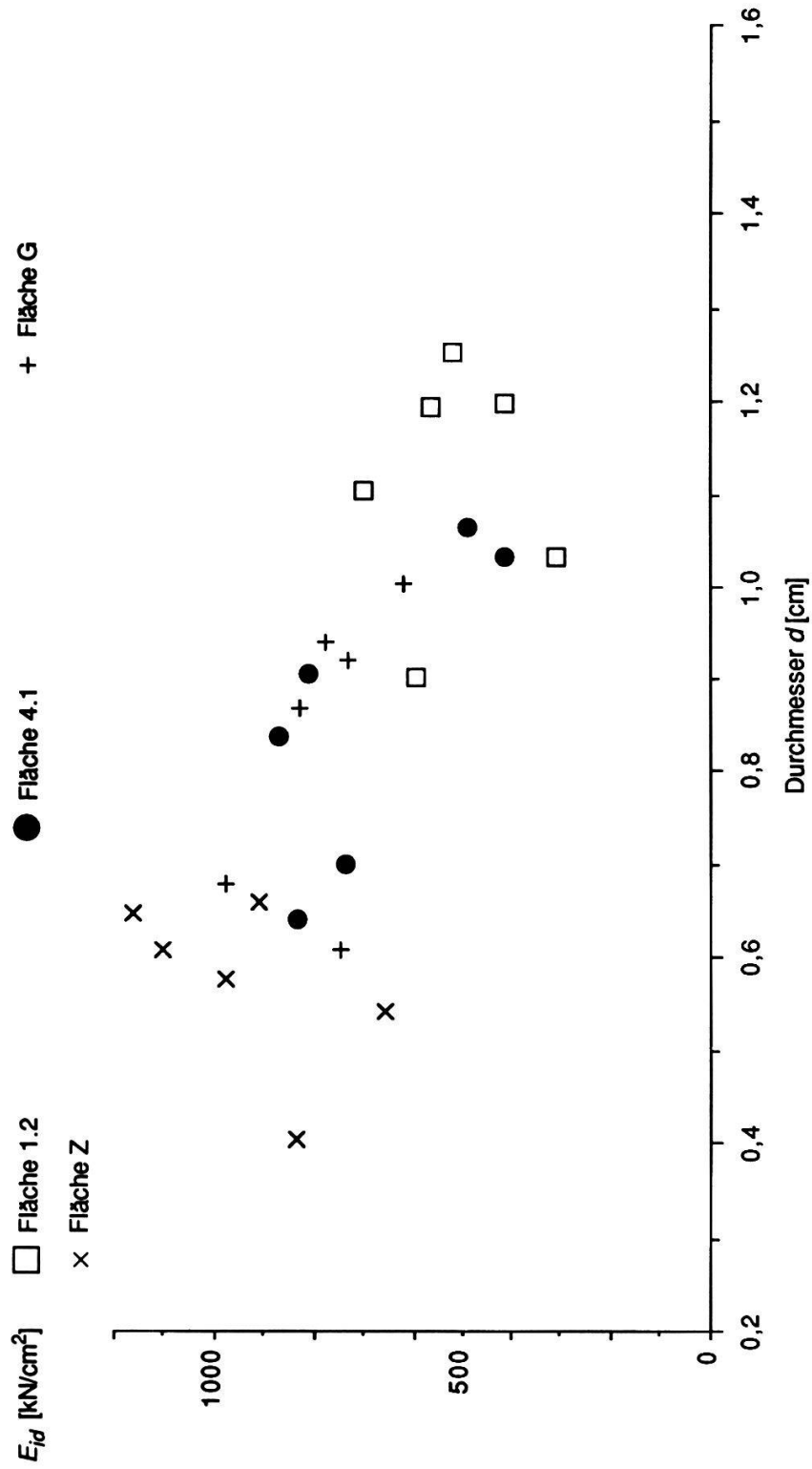


Fig. 3.14. Ideeller E-Modul der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke vom 12. 8. 79.

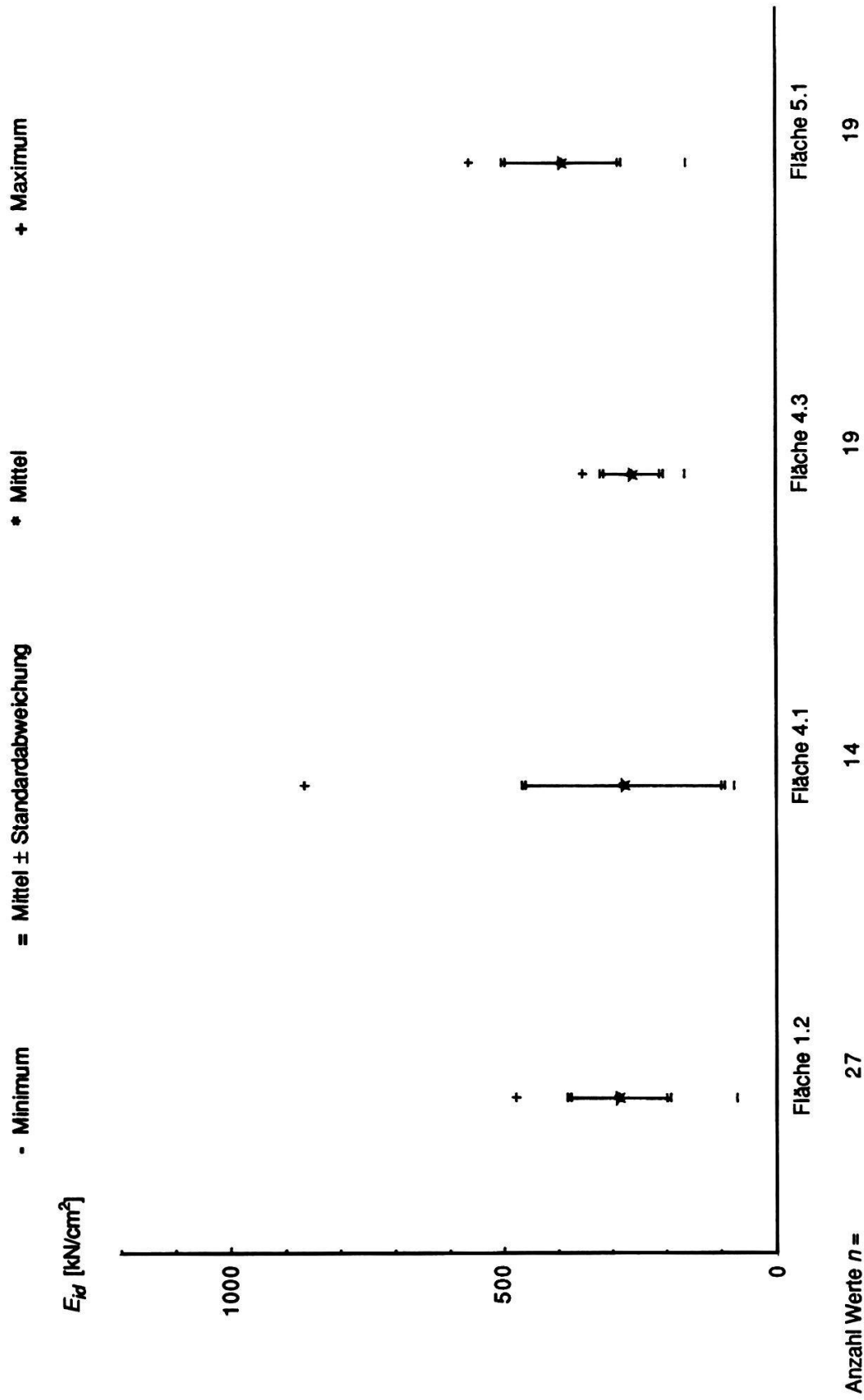


Fig. 3.15. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 13. 6. 79. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie.

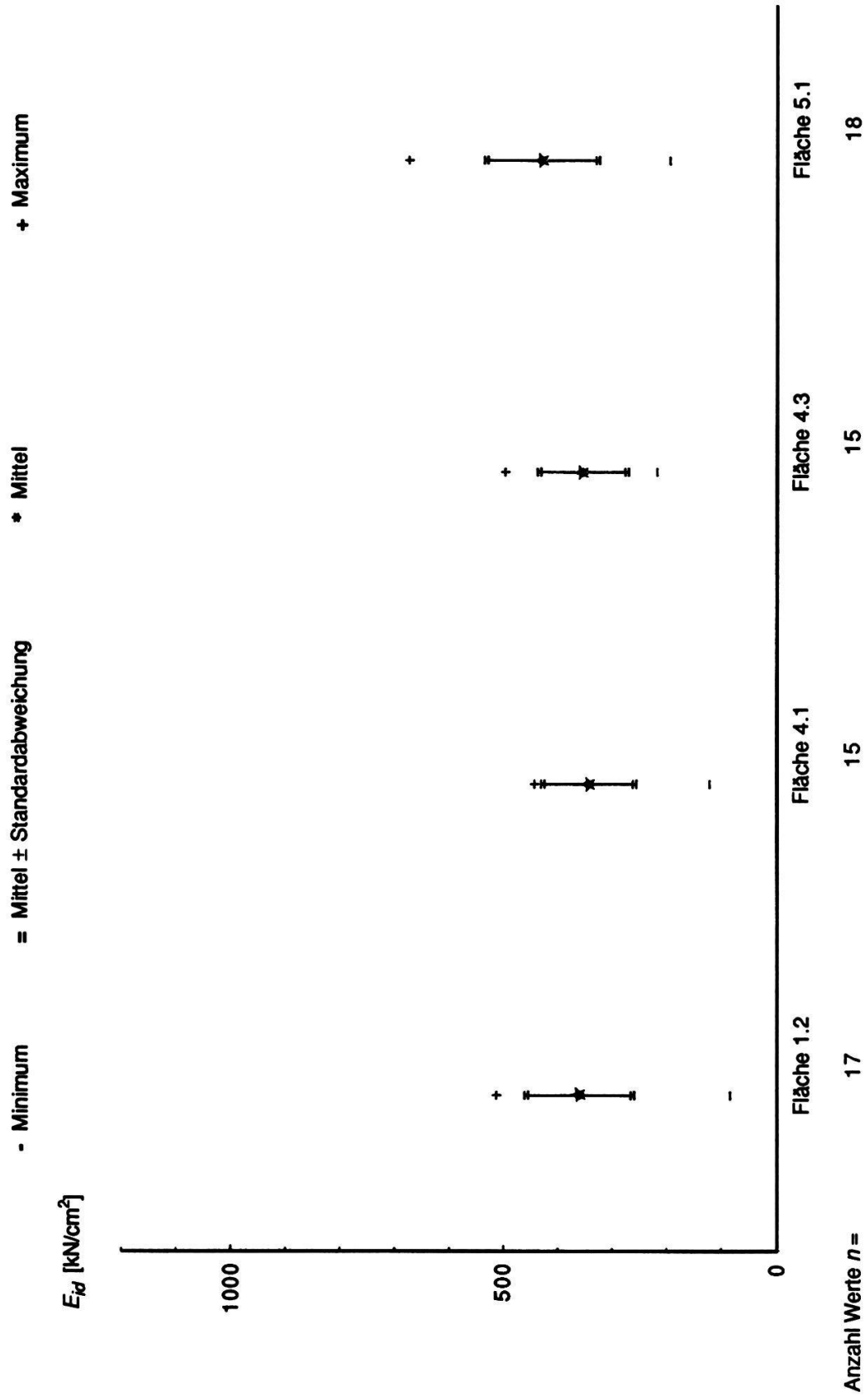


Fig. 3.16. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 27. 6. 79.
Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie.

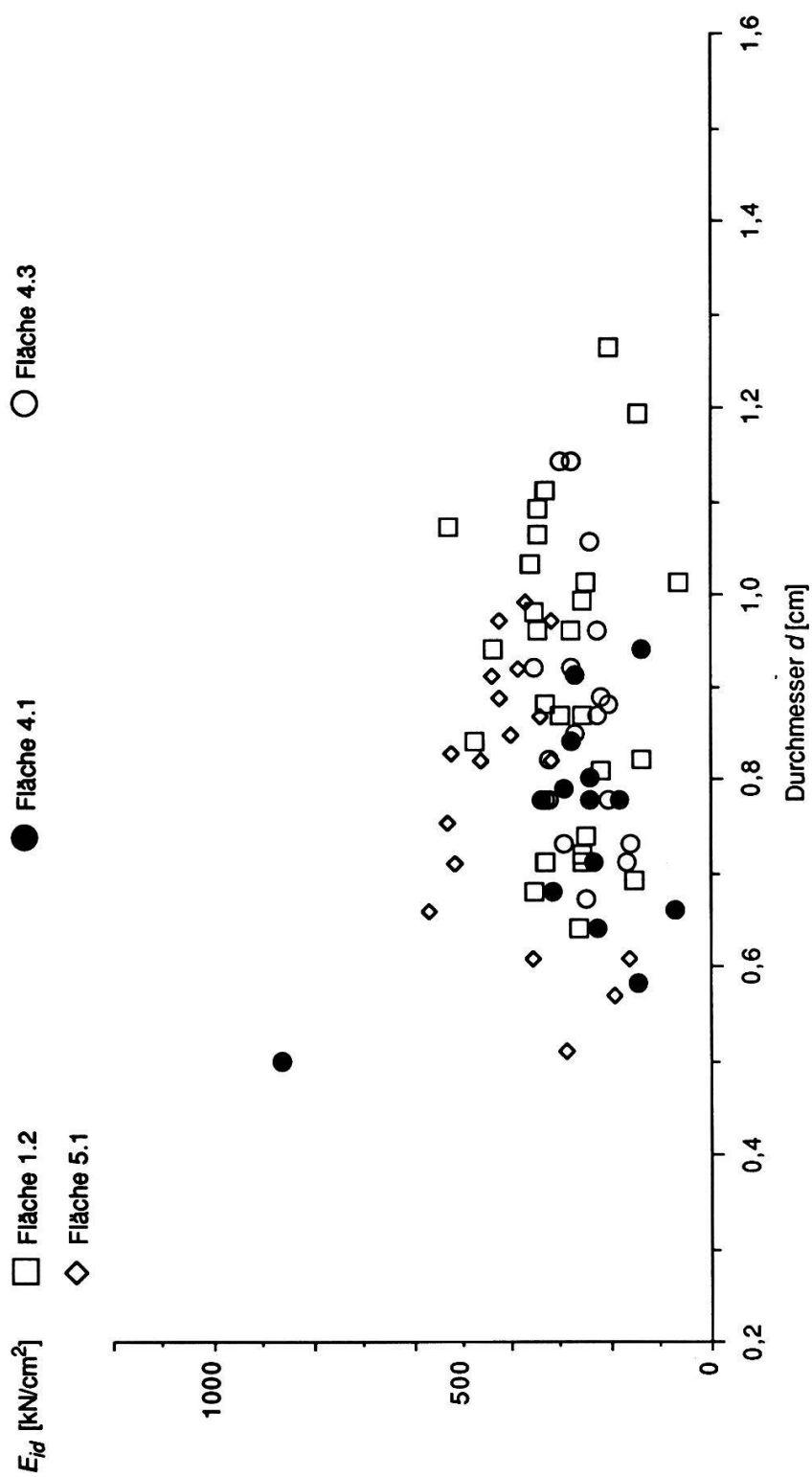


Fig. 3.17. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenheim in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 13. 6. 79.

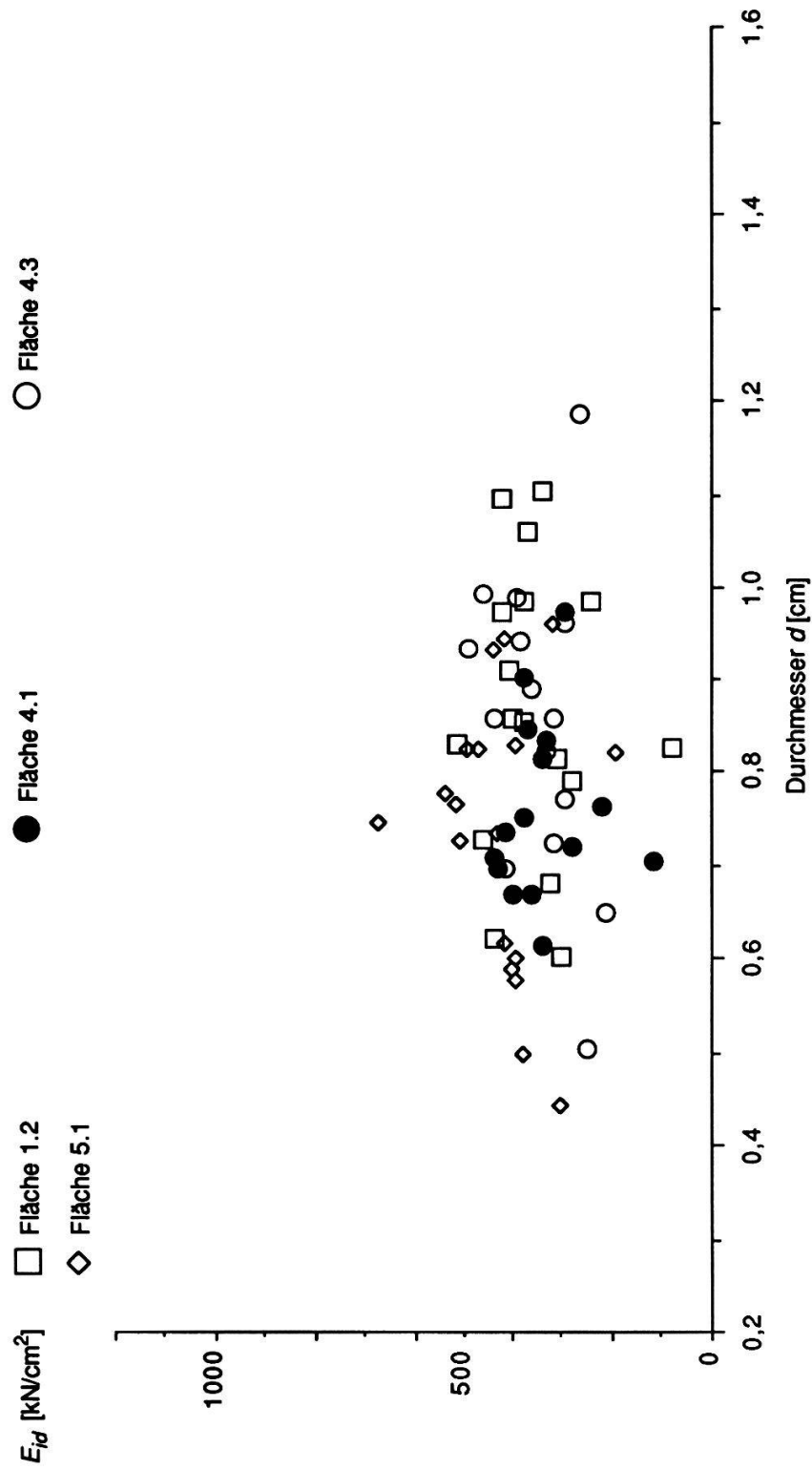


Fig. 3.18. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 27. 6. 79.

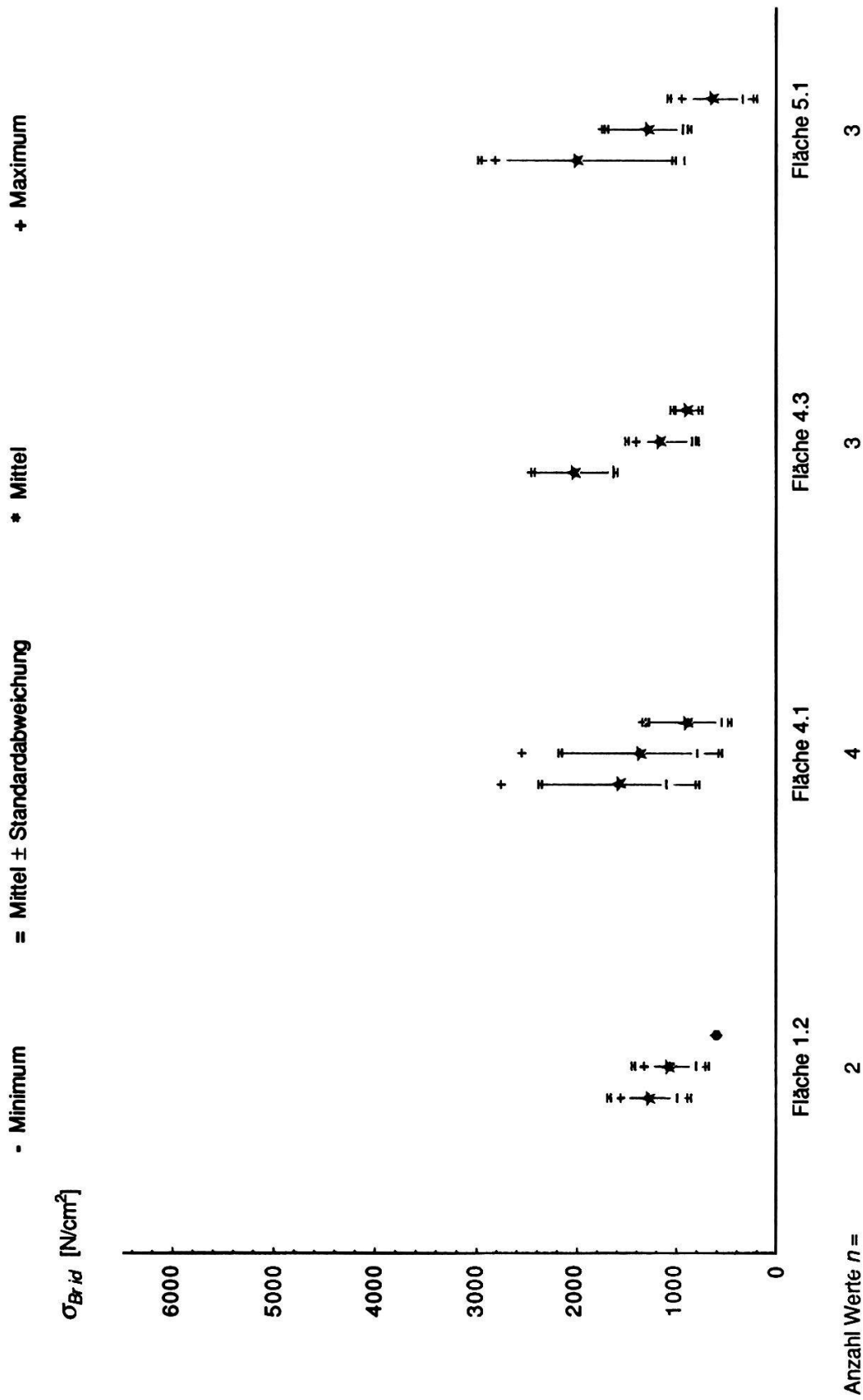


Fig. 3.19. Ideelle Bruchspannung der geprüften Schilfhalm aus Altenheim vom 13. 6. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

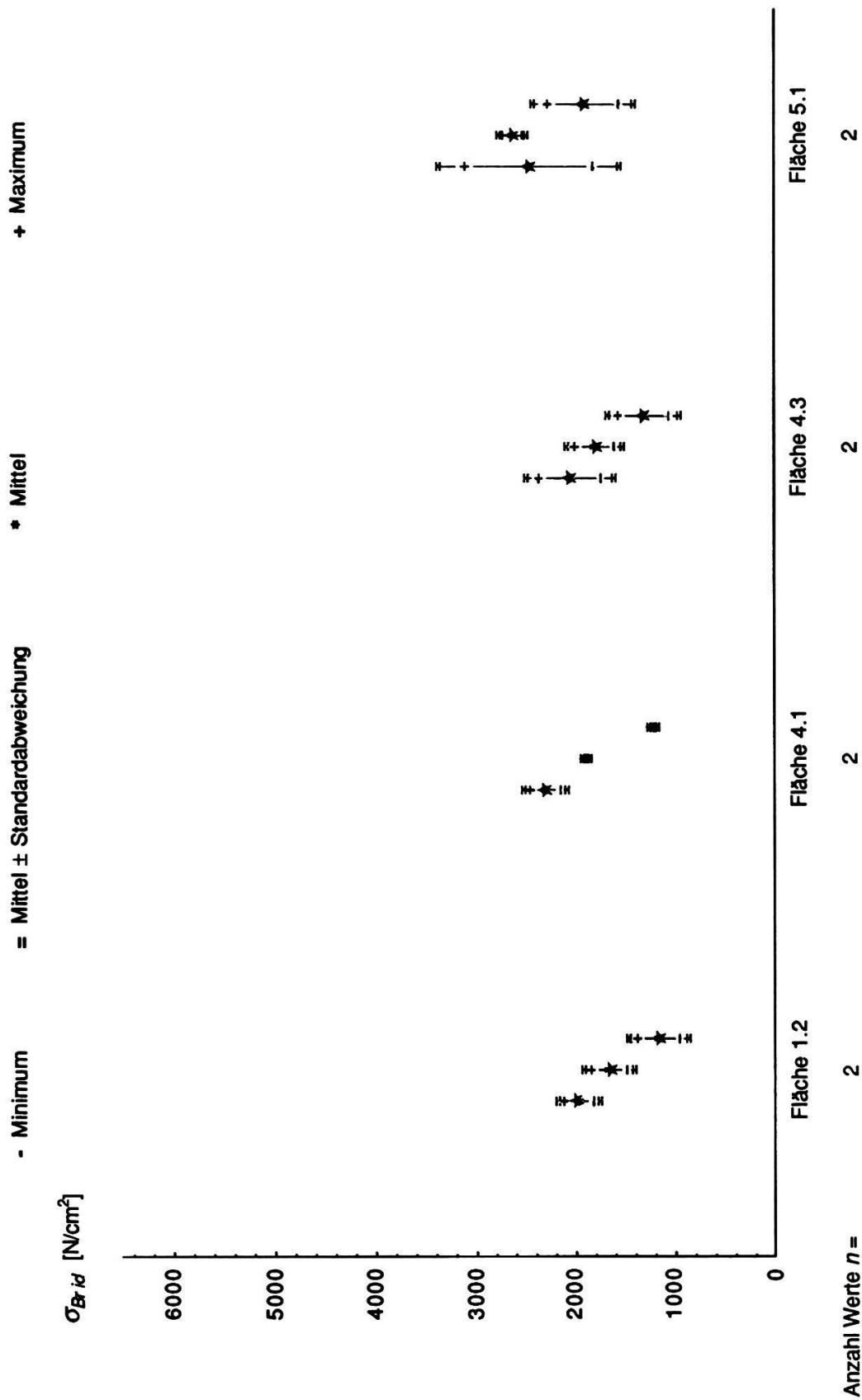


Fig. 3.20. Ideelle Bruchspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 27. 6. 79. Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücker.

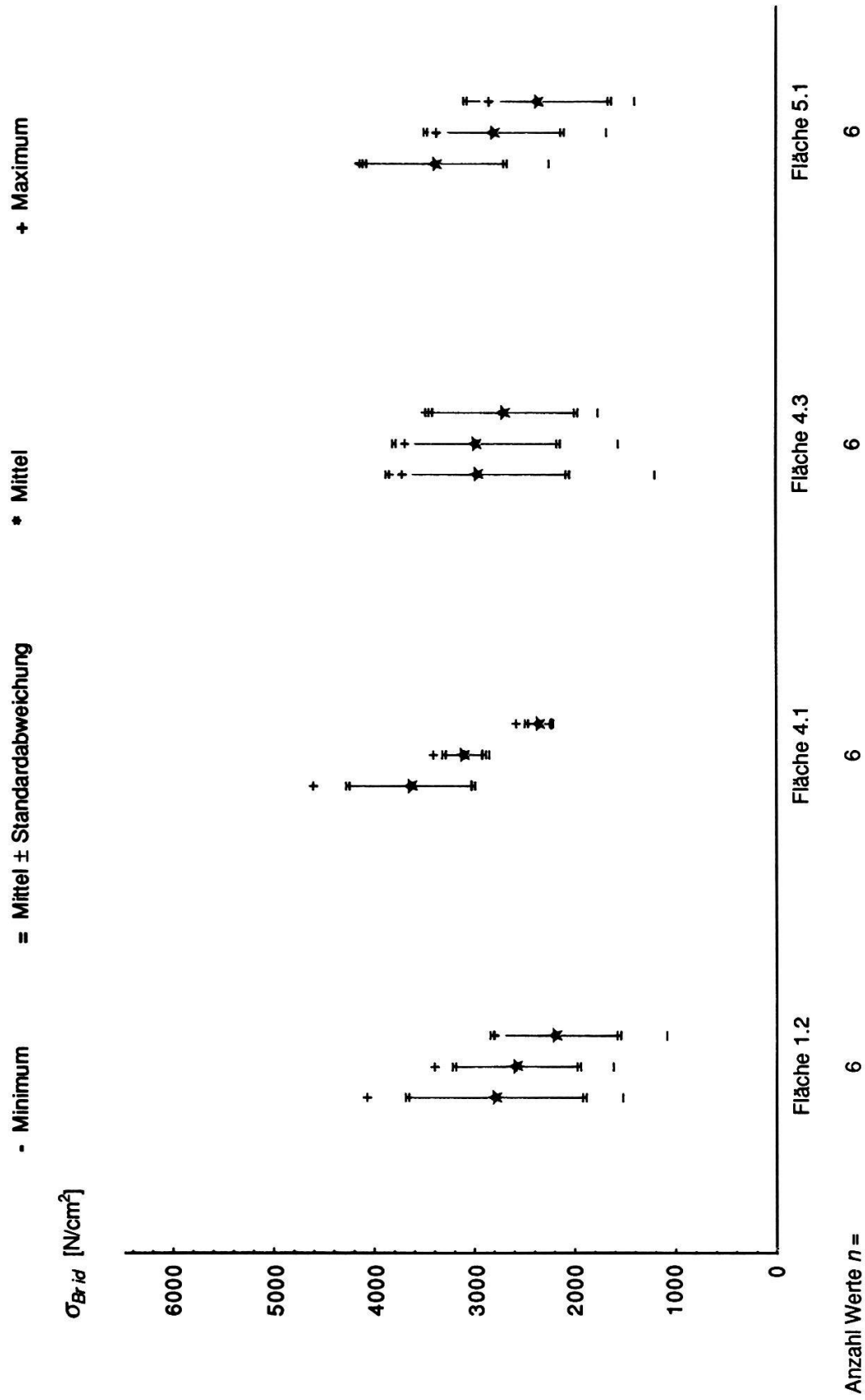


Fig. 3.21. Ideale Bruchspannung der geprüften Schilfhalm aus Altenrhein vom 23. 7. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

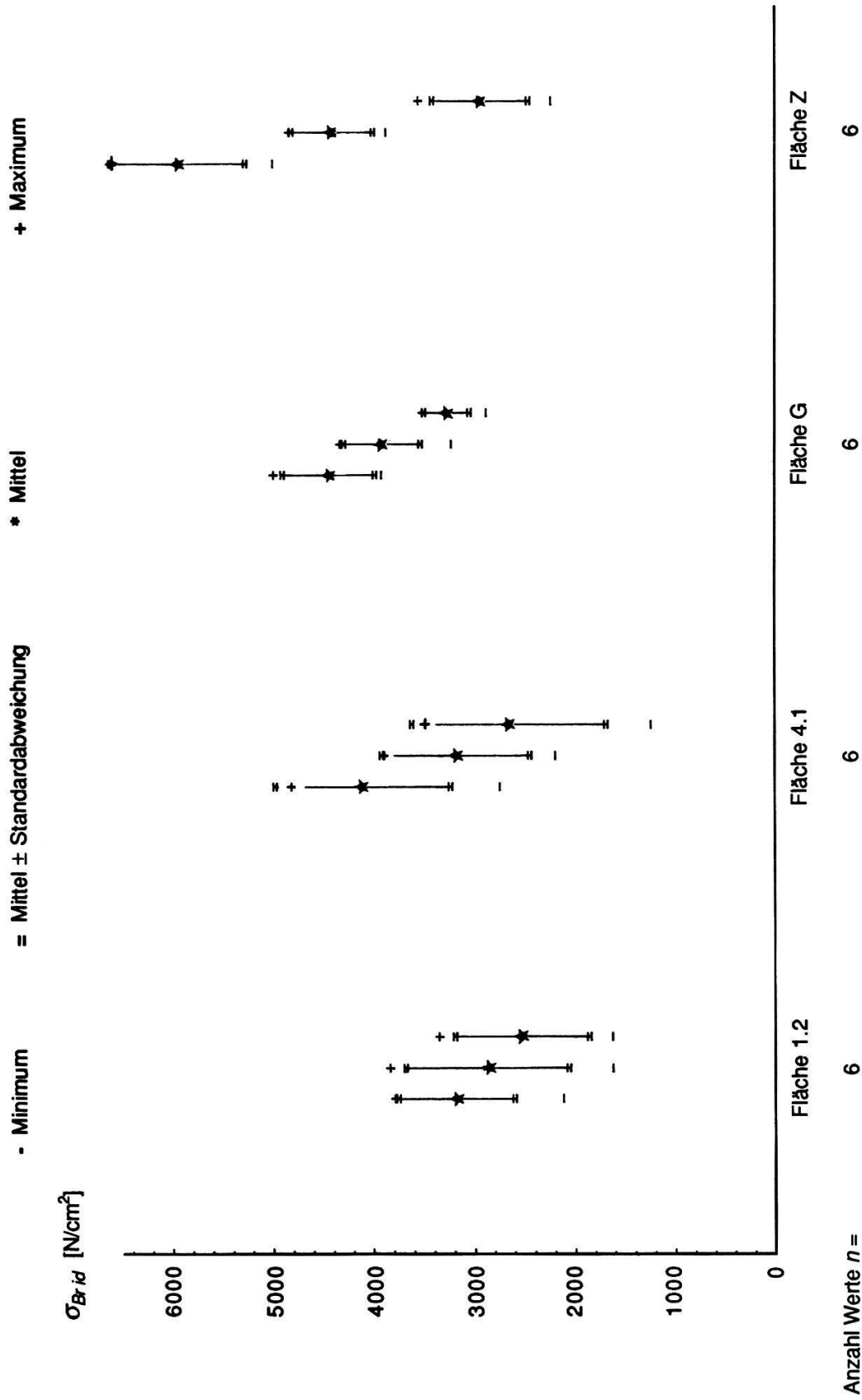


Fig. 3.22. Ideelle Bruchspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 12. 8. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

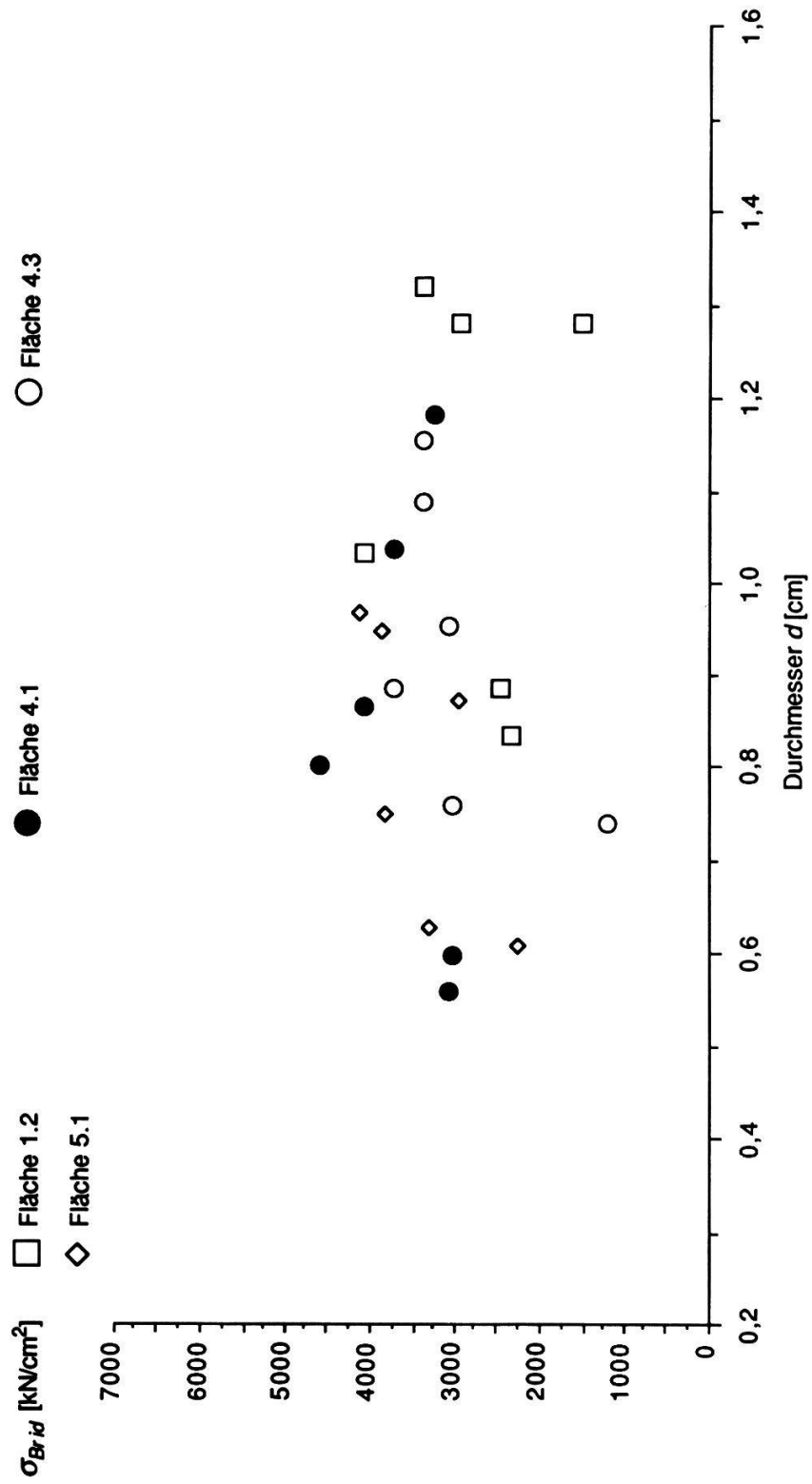


Fig. 3.23. Ideale Bruchspannung der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers, unterste Stücke vom 23. 7. 79.

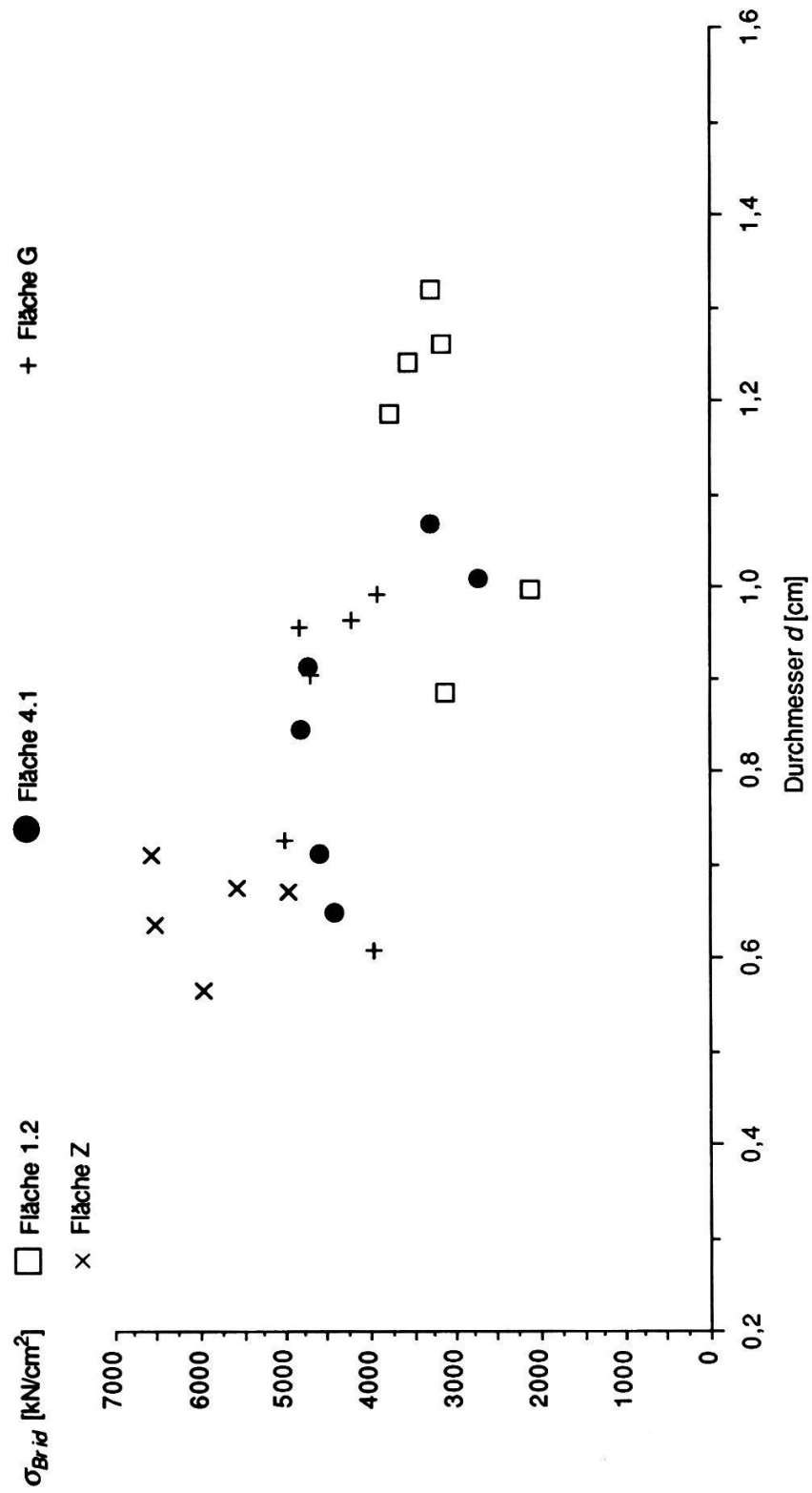


Fig. 3.24. Ideelle Bruchspannung der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers, unterste Stücke vom 12. 8. 79.

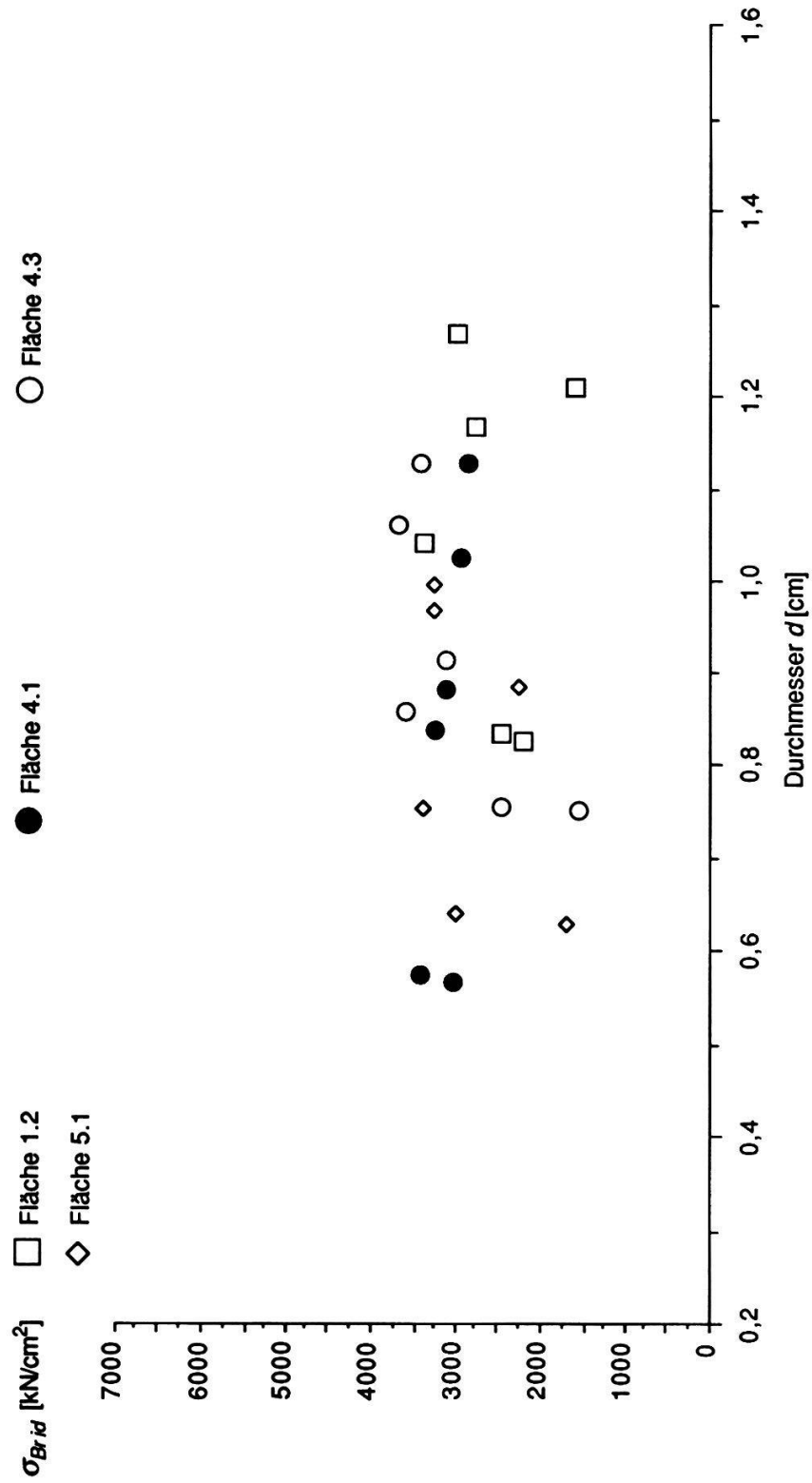


Fig. 3.25. Ideelle Bruchspannung der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke vom 23. 7. 79.

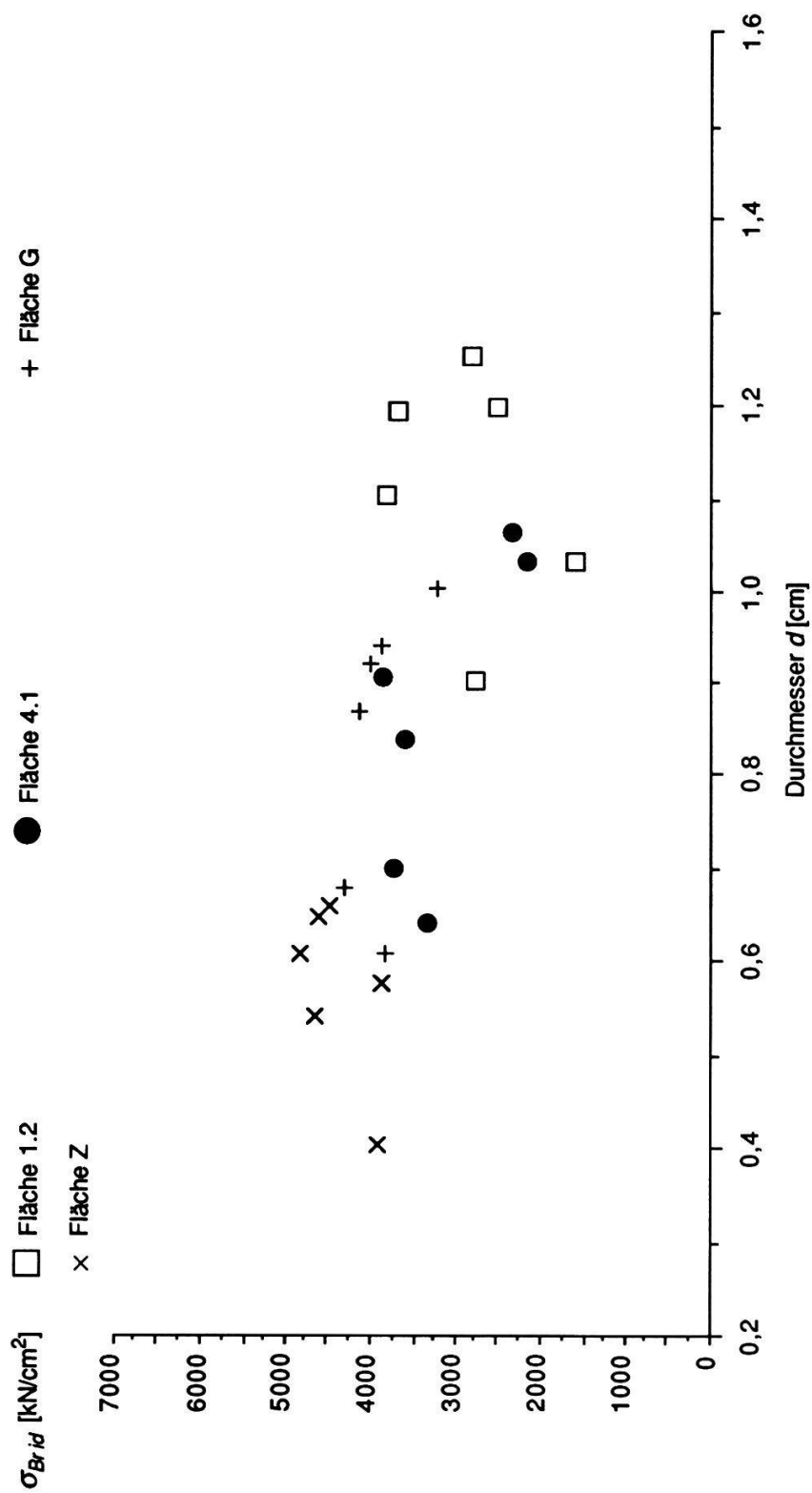


Fig. 3.26. Ideelle Bruchspannung der Schilfhalme aus Altenheim in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke vom 12. 8. 79.

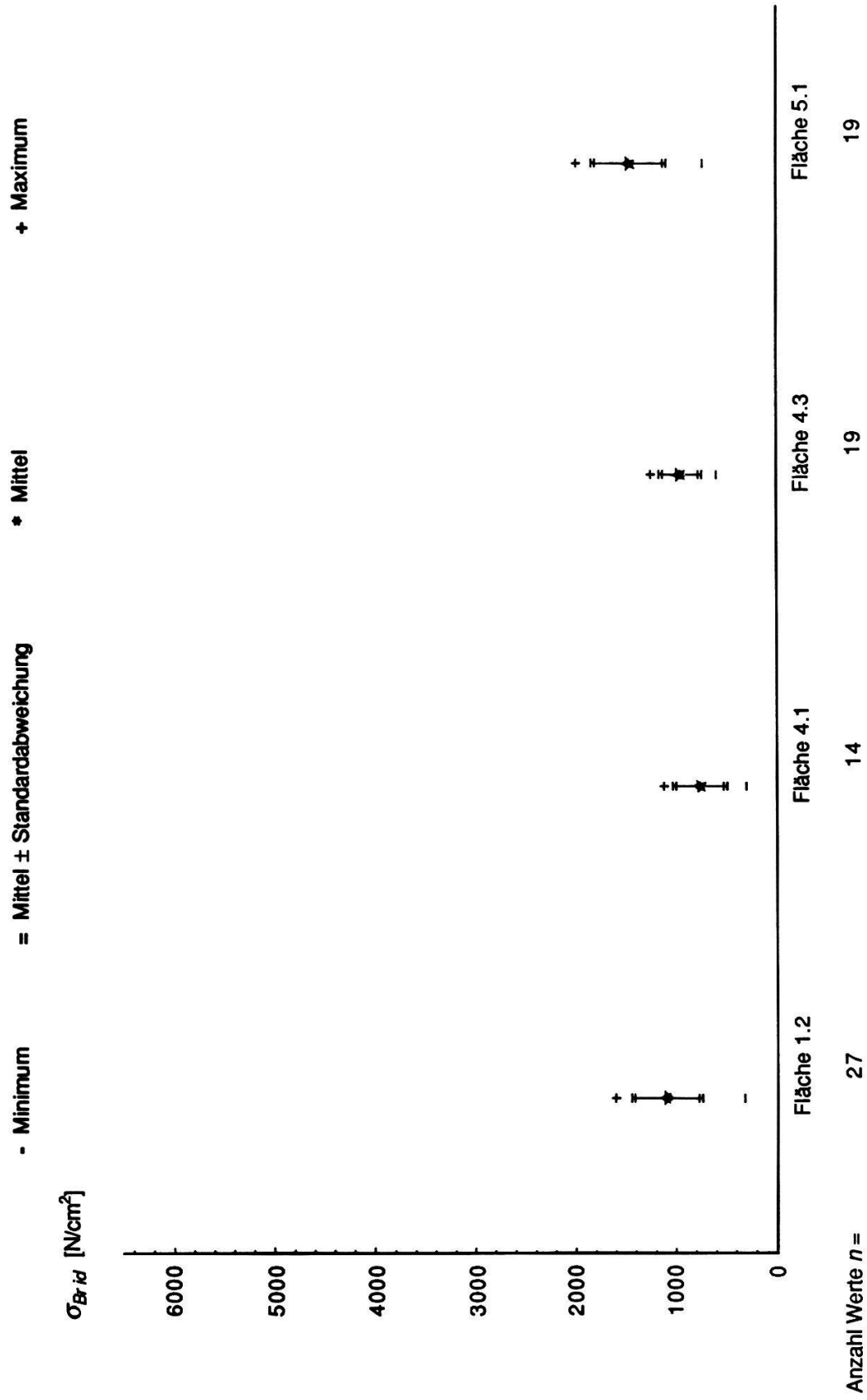


Fig. 3.27. Ideelle Bruchspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 13. 6. 79. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie.

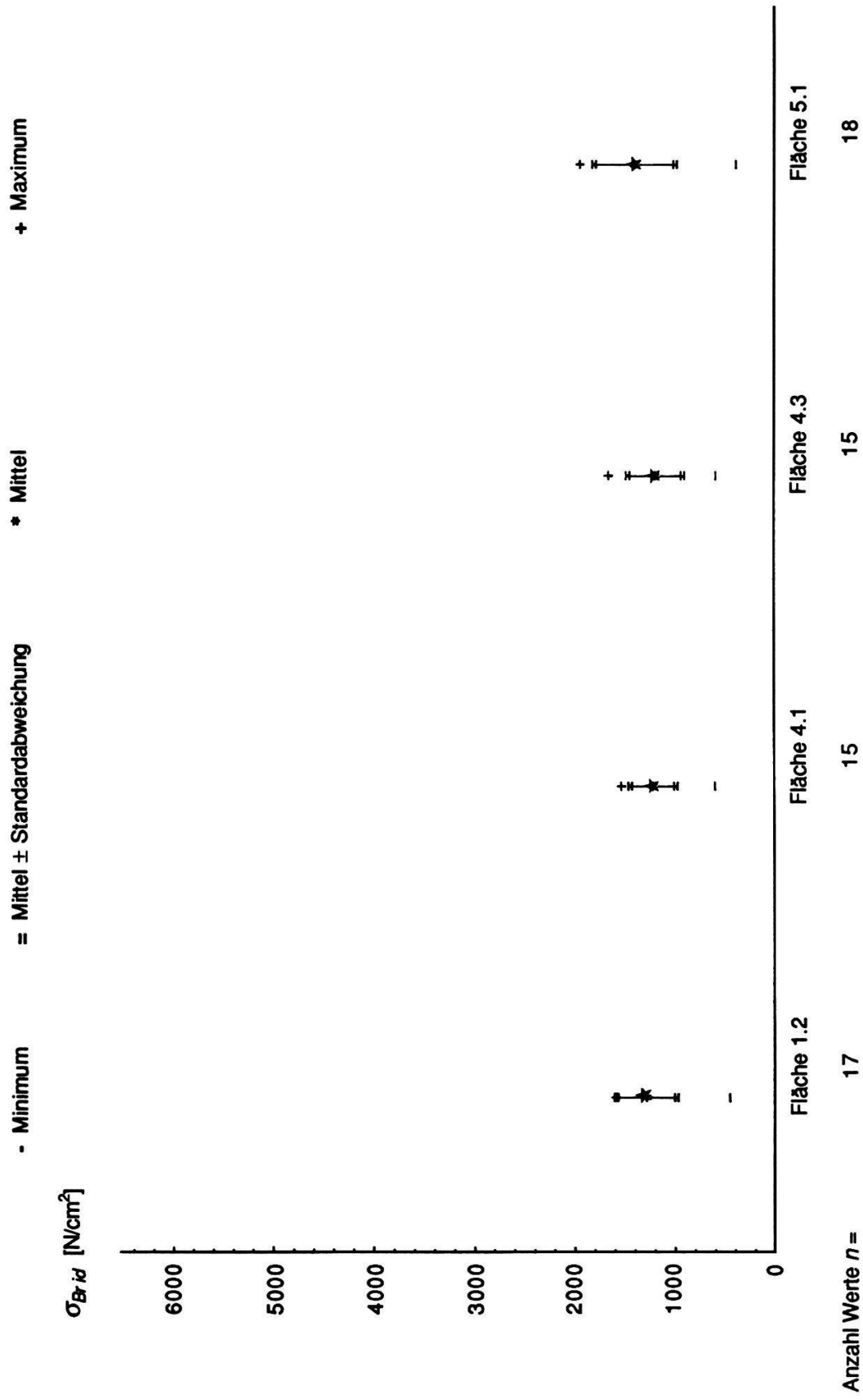


Fig. 3.28. Ideelle Bruchspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrheine vom 27. 6. 79. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie.

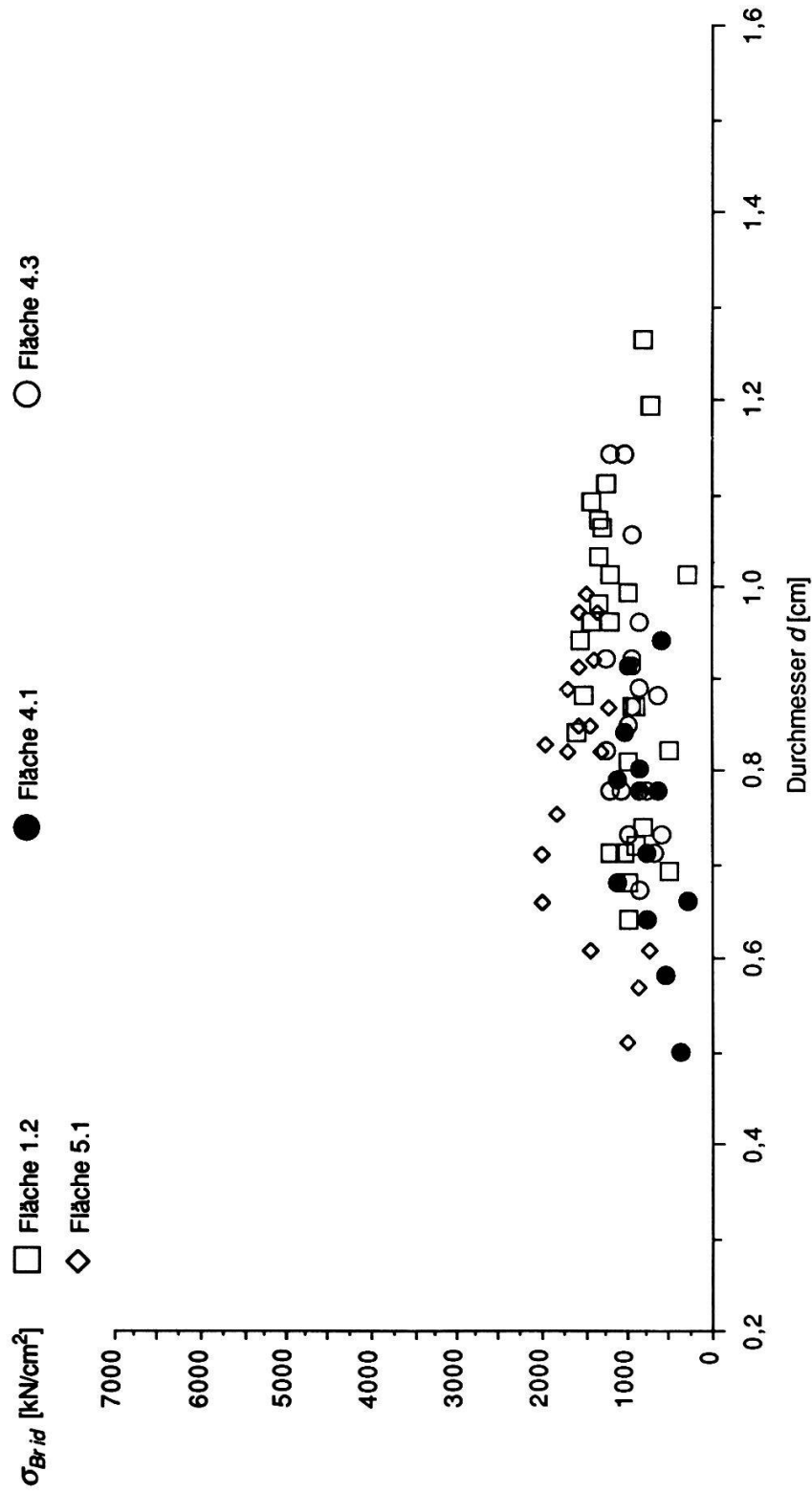


Fig. 3.29. Ideelle Bruchspannung der Schilfhalme aus Altenheim in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 13. 6. 79.

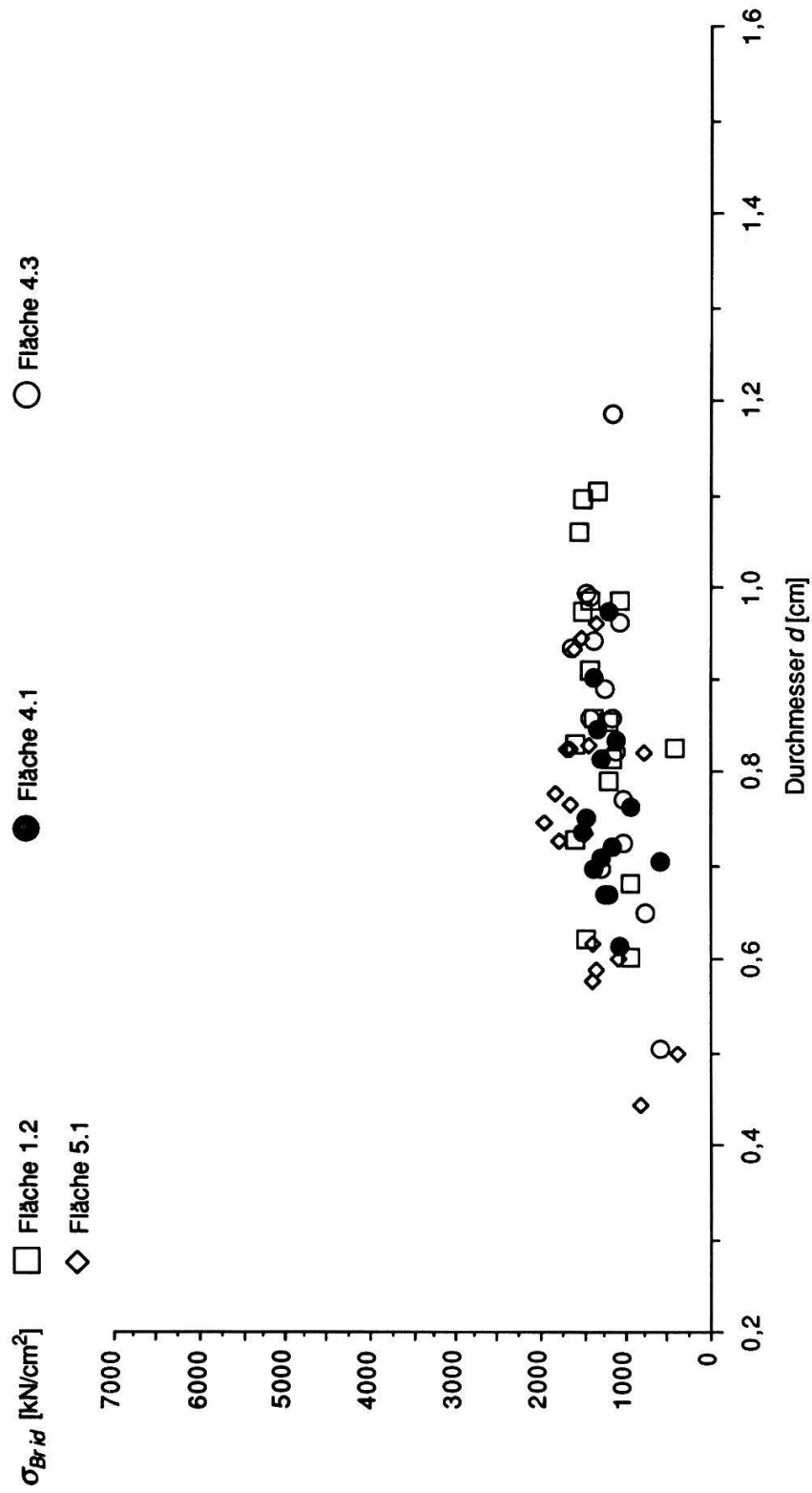


Fig. 3.30. Ideelle Bruchspannung der Schilfhalme aus Altenheim in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 27. 6. 79.

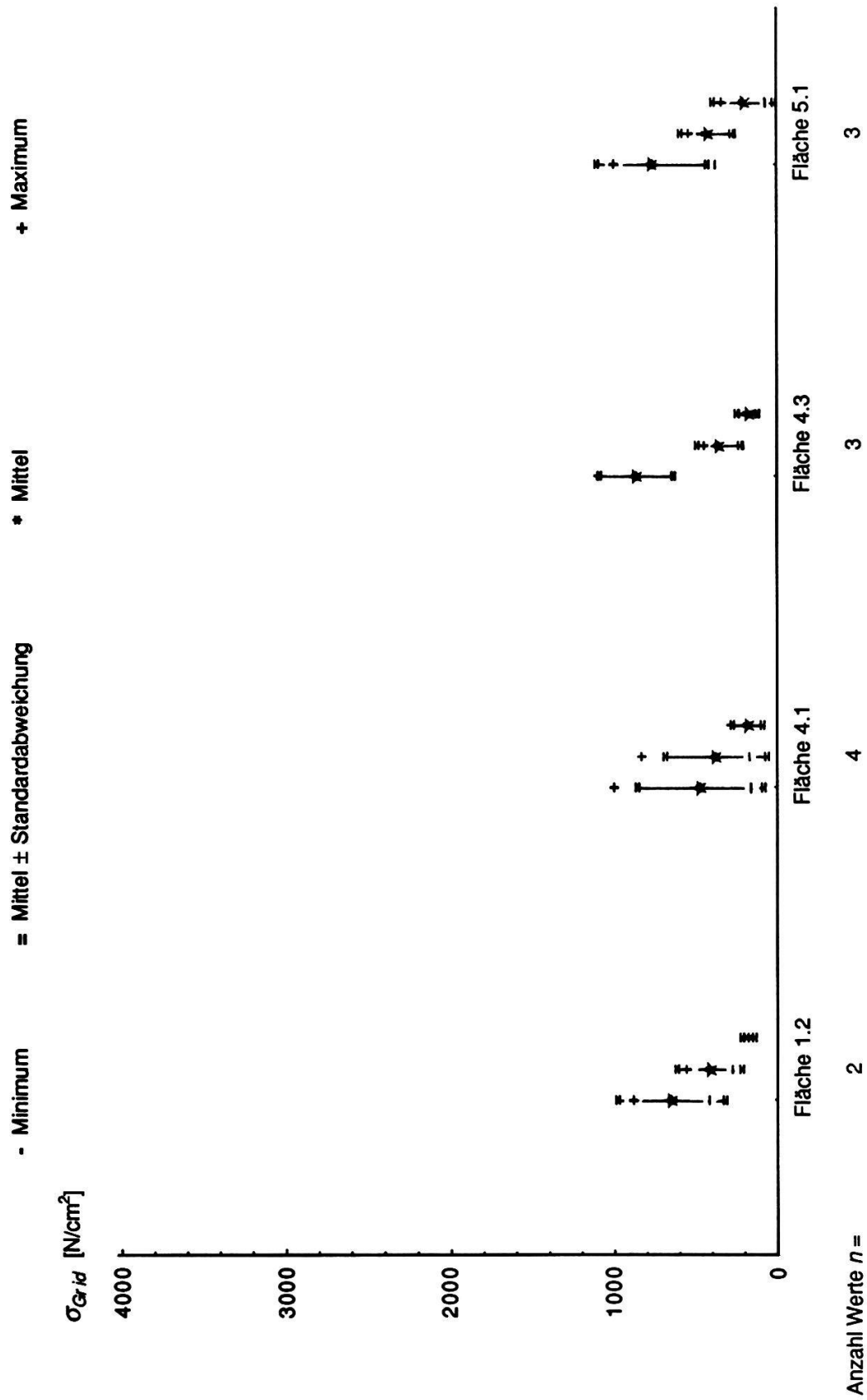


Fig. 3.31. Ideelle Grenzspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 13. 6. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

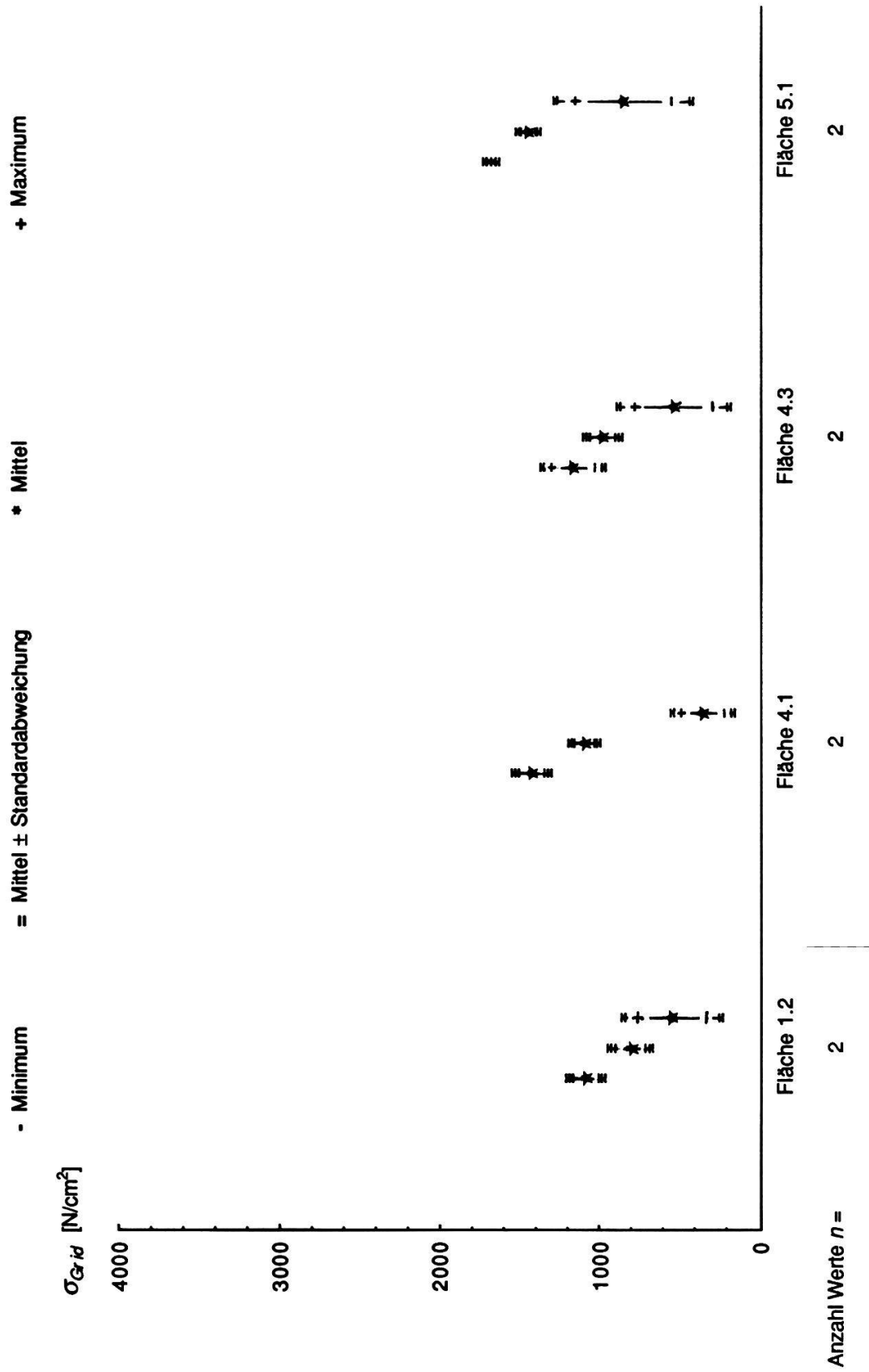


Fig. 3.32. Ideelle Grenzspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 27. 6. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und dritunterste Stücke.

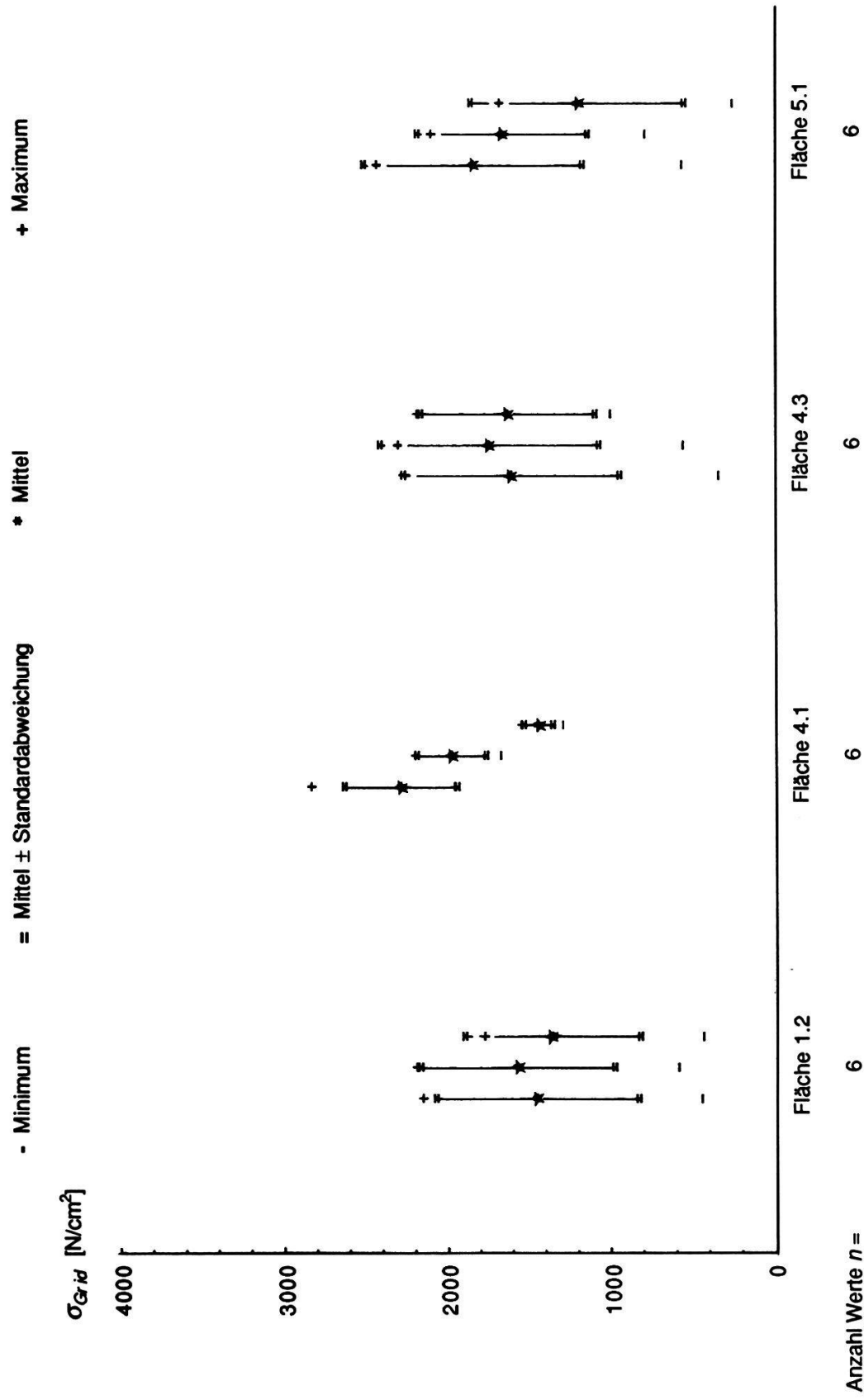


Fig. 3.33. Ideelle Grenzspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 23. 7. 79. Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

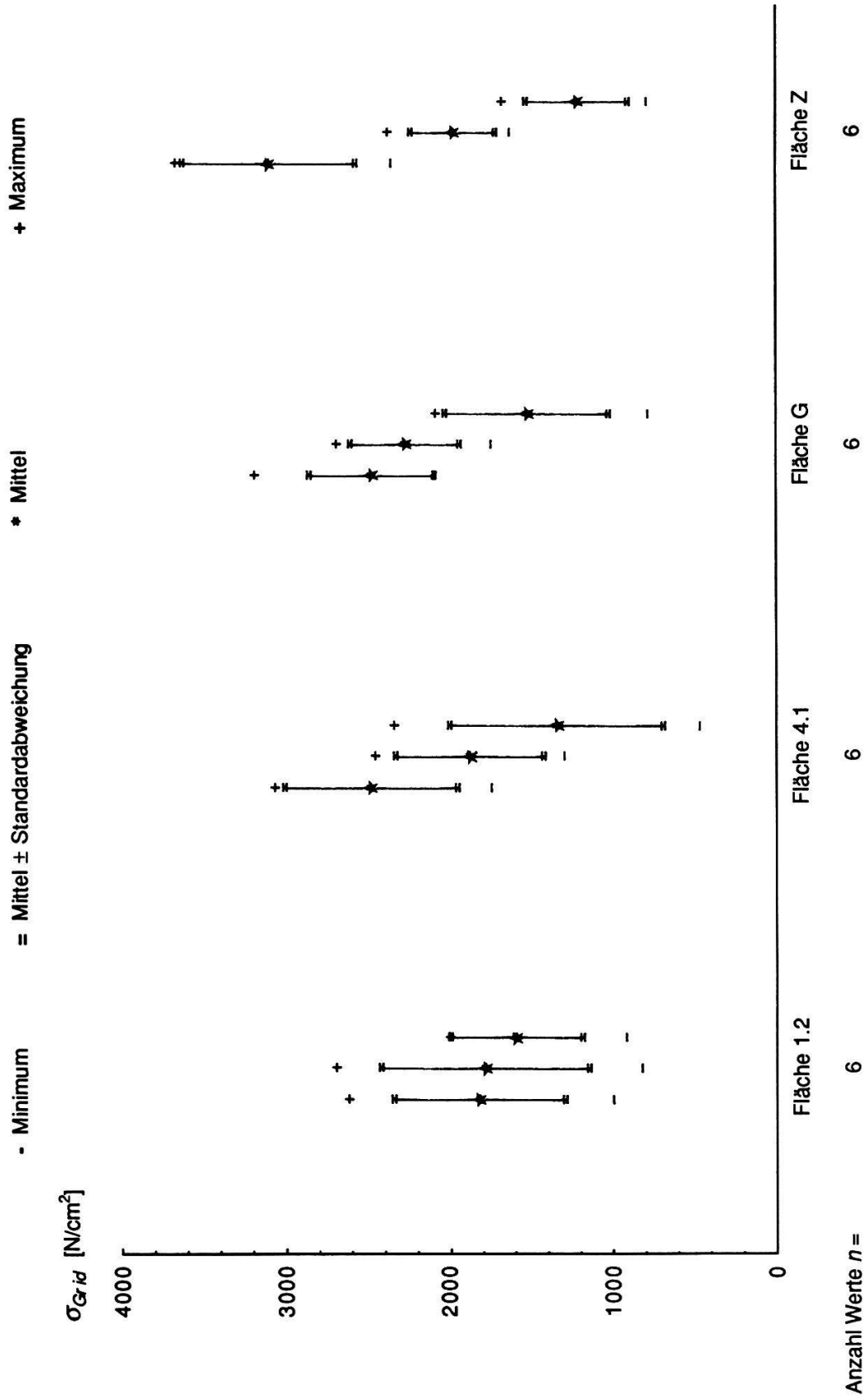


Fig. 3.34. Ideelle Grenzspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 12. 8. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

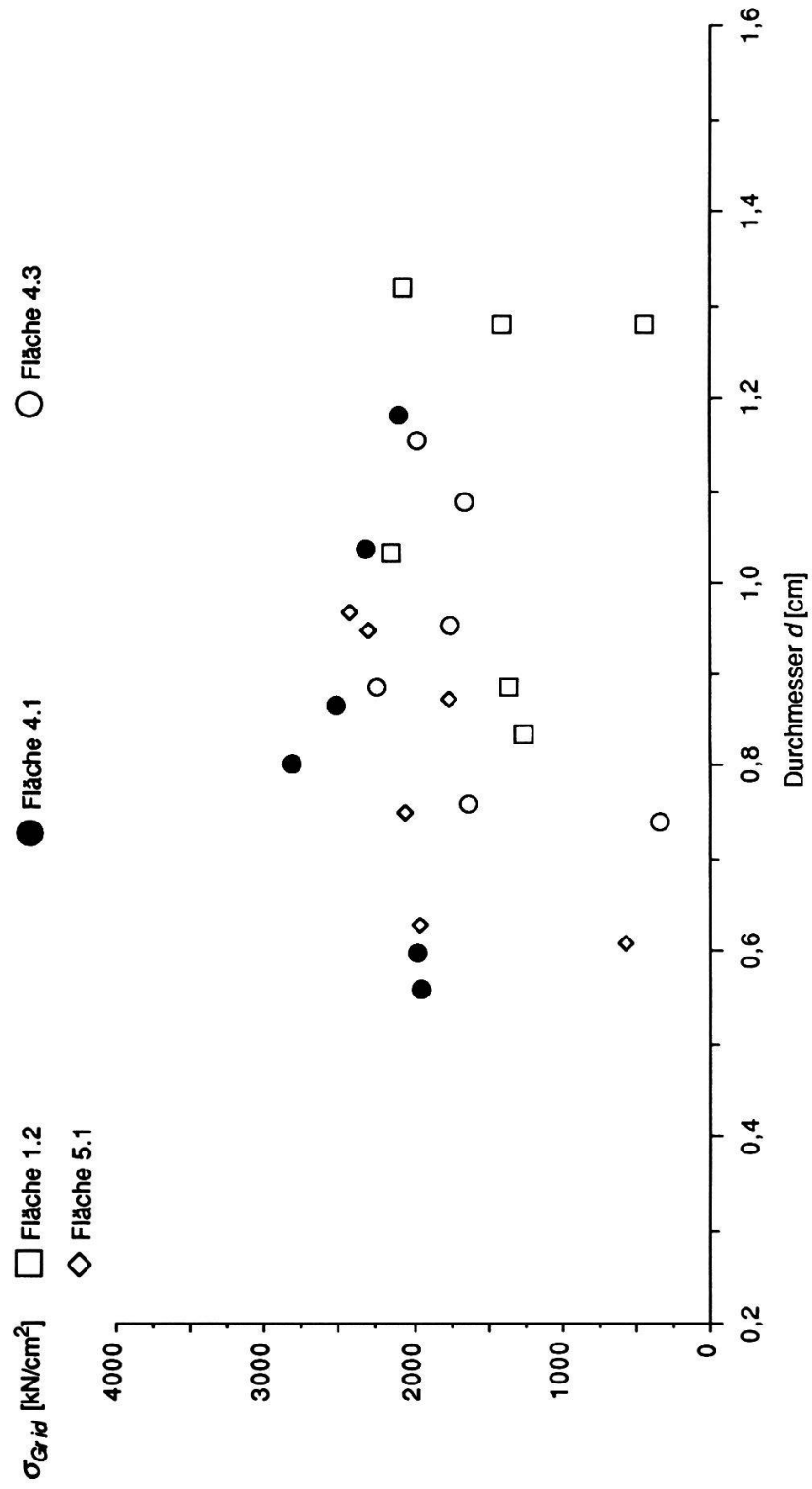


Fig. 3.35. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers, unterste Stücke vom 23. 7. 79.

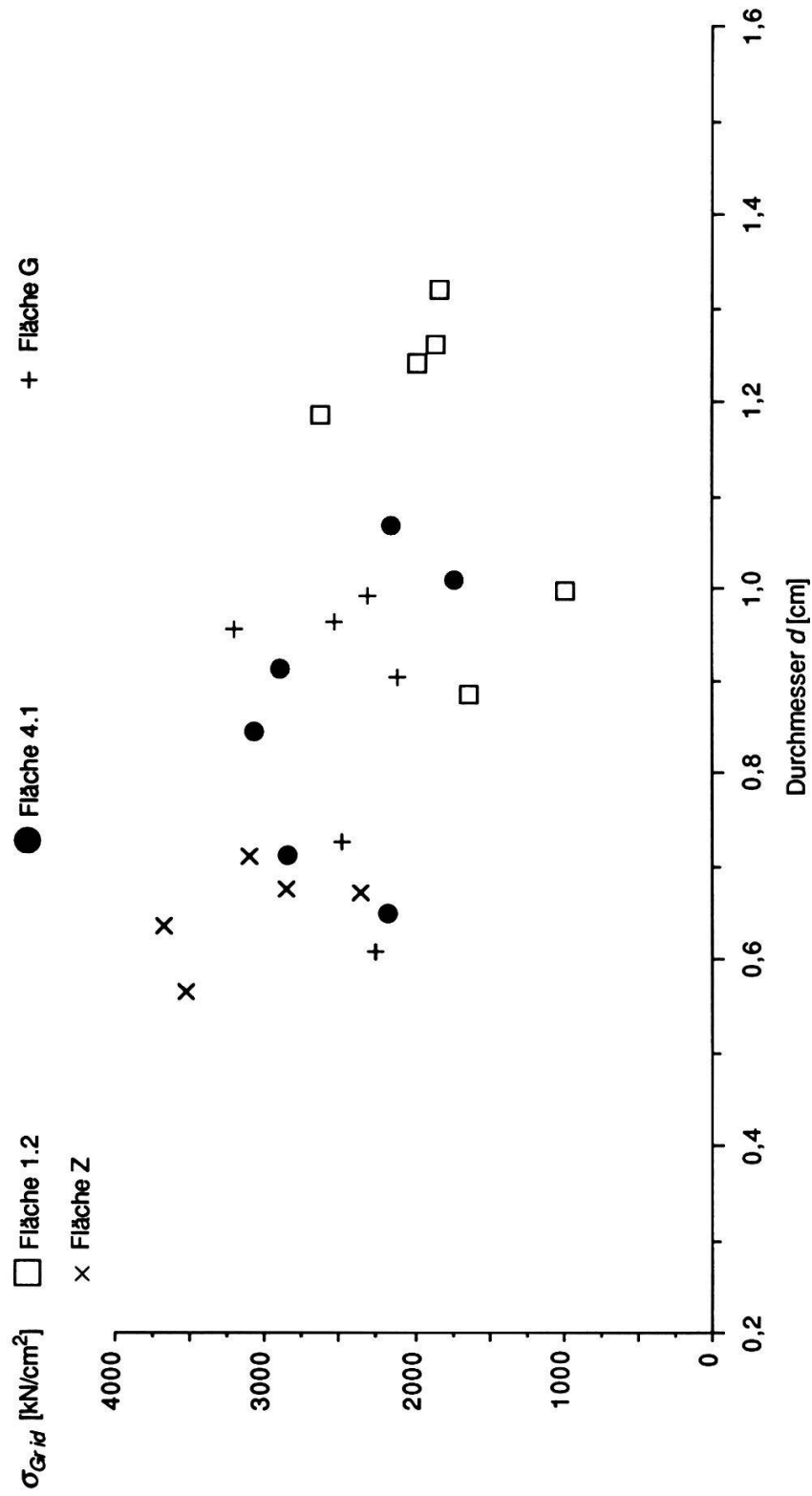


Fig. 3.36. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Altenheim in Funktion des Durchmessers, unterste Stücke vom 12. 8. 79.

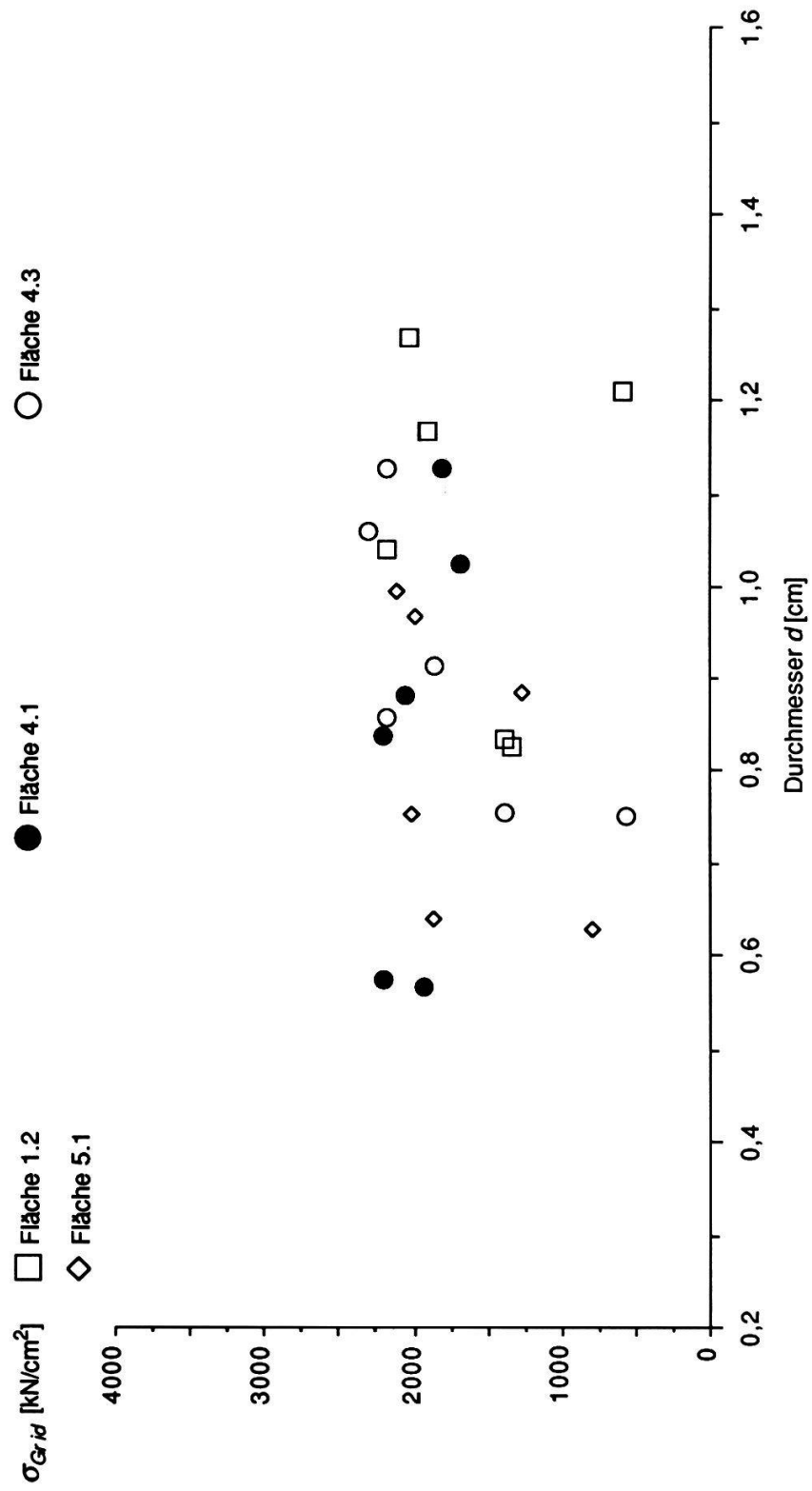


Fig. 3.37. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke vom 23. 7. 79.

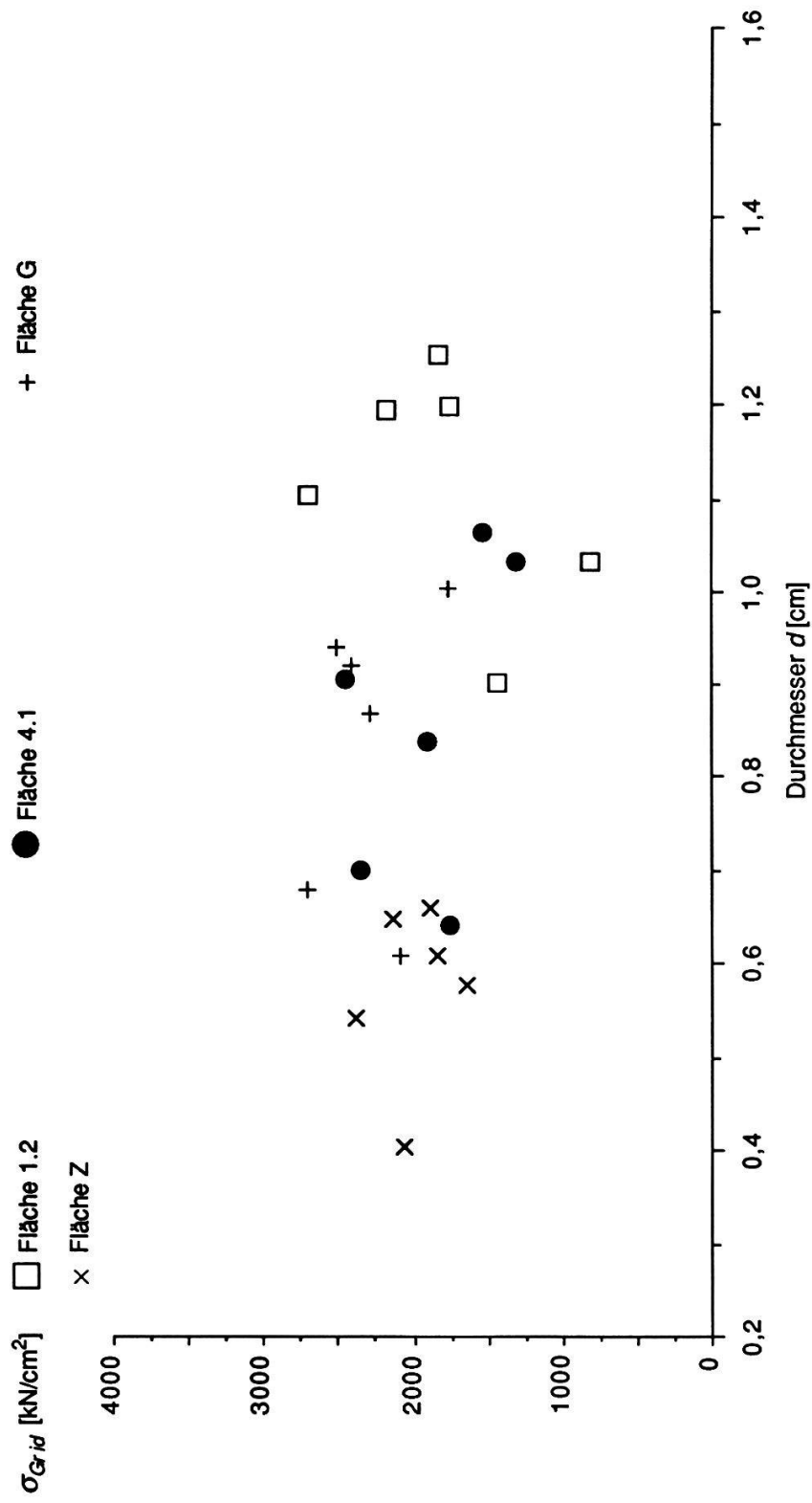


Fig. 3.38. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Altenheim in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke vom 12. 8. 79.

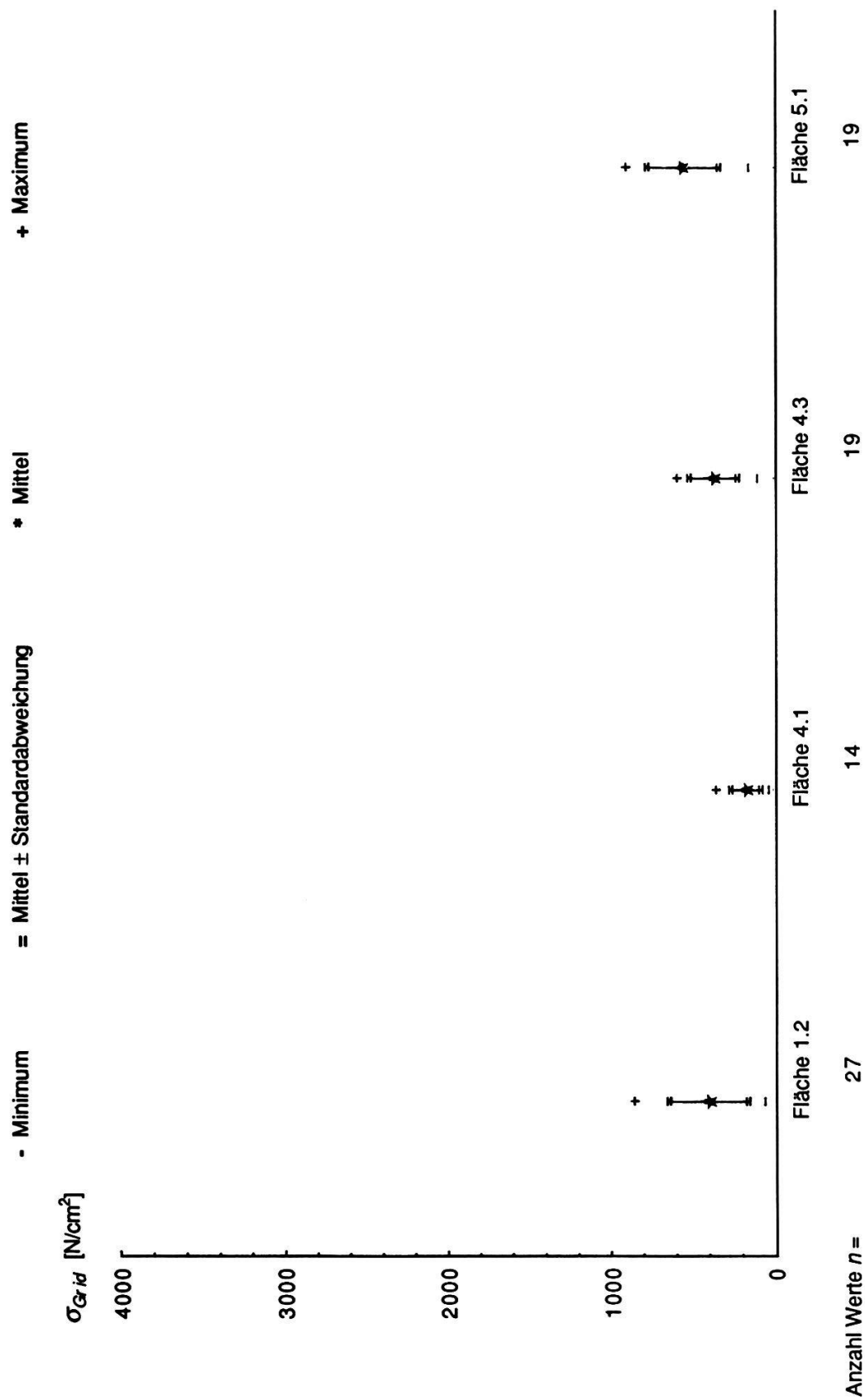


Fig. 3.39. Ideelle Grenzspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 13. 6. 79. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie.

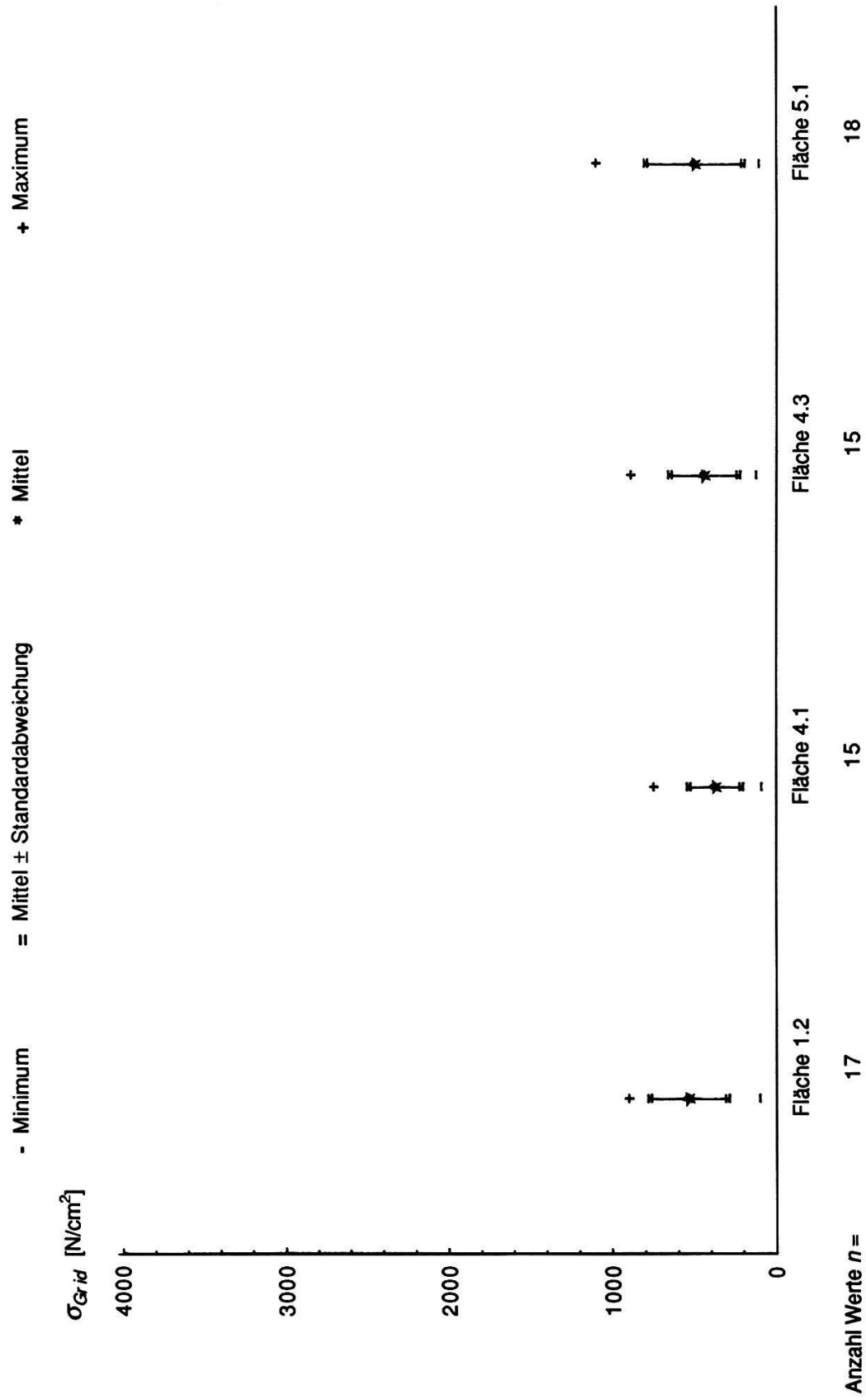


Fig. 3.40. Ideelle Grenzspannung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 27. 6. 79. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie.

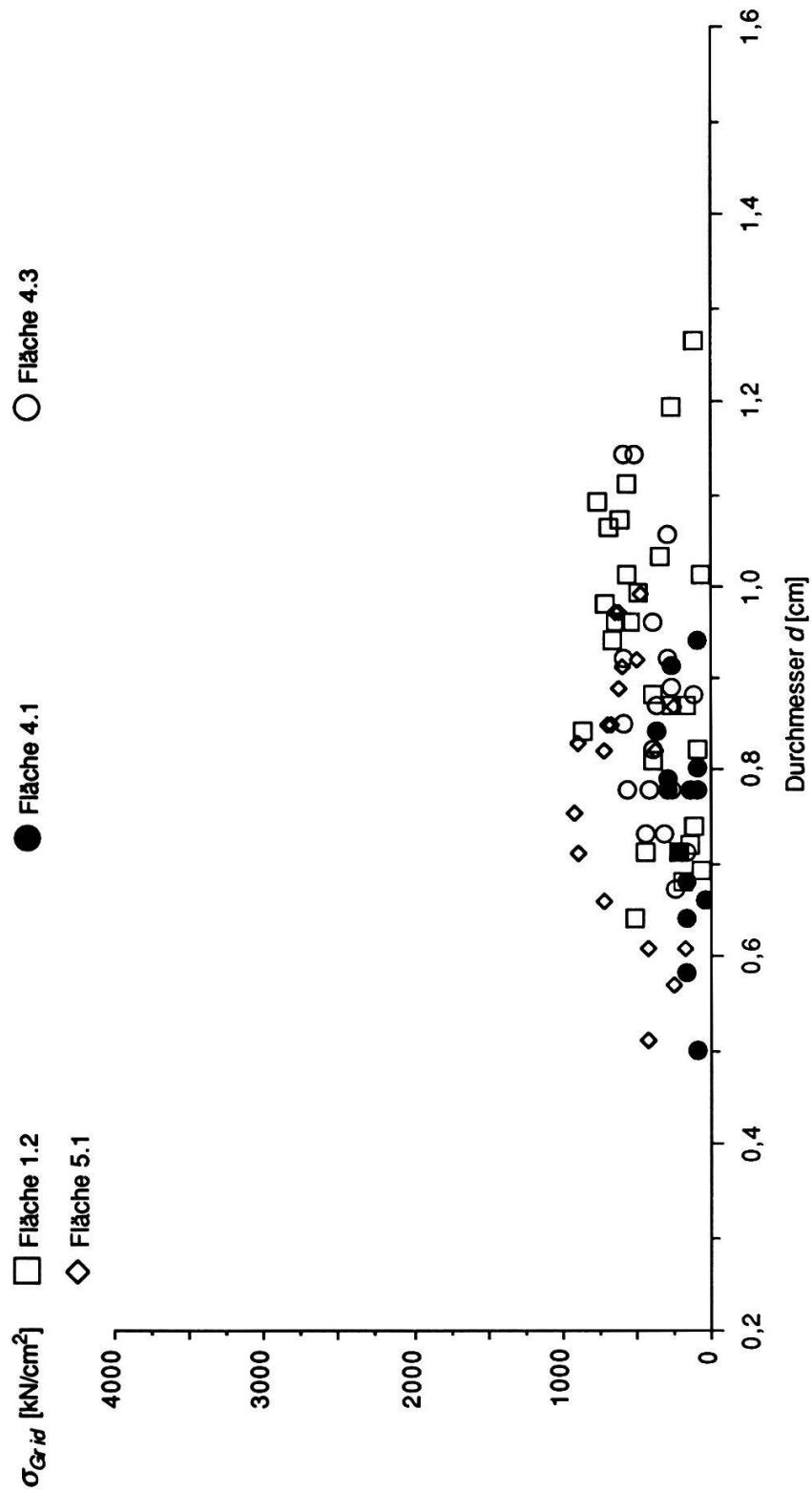


Fig. 3.41. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Altenrhein in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 13. 6. 79.

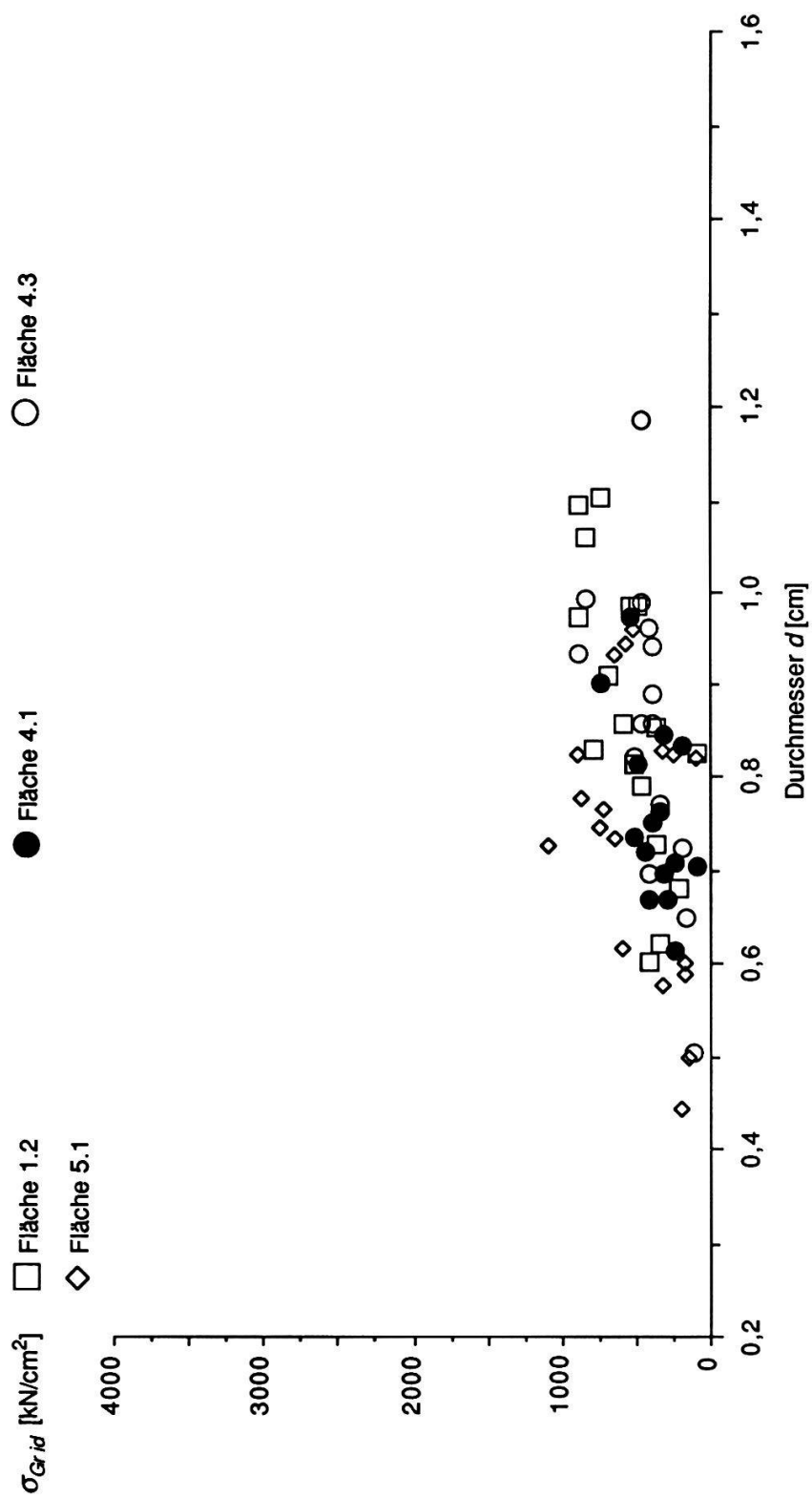


Fig. 3.42. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Altenheim in Funktion des Durchmessers. Einzelstücke aus der Höhe der Wasserlinie vom 27. 6. 79.

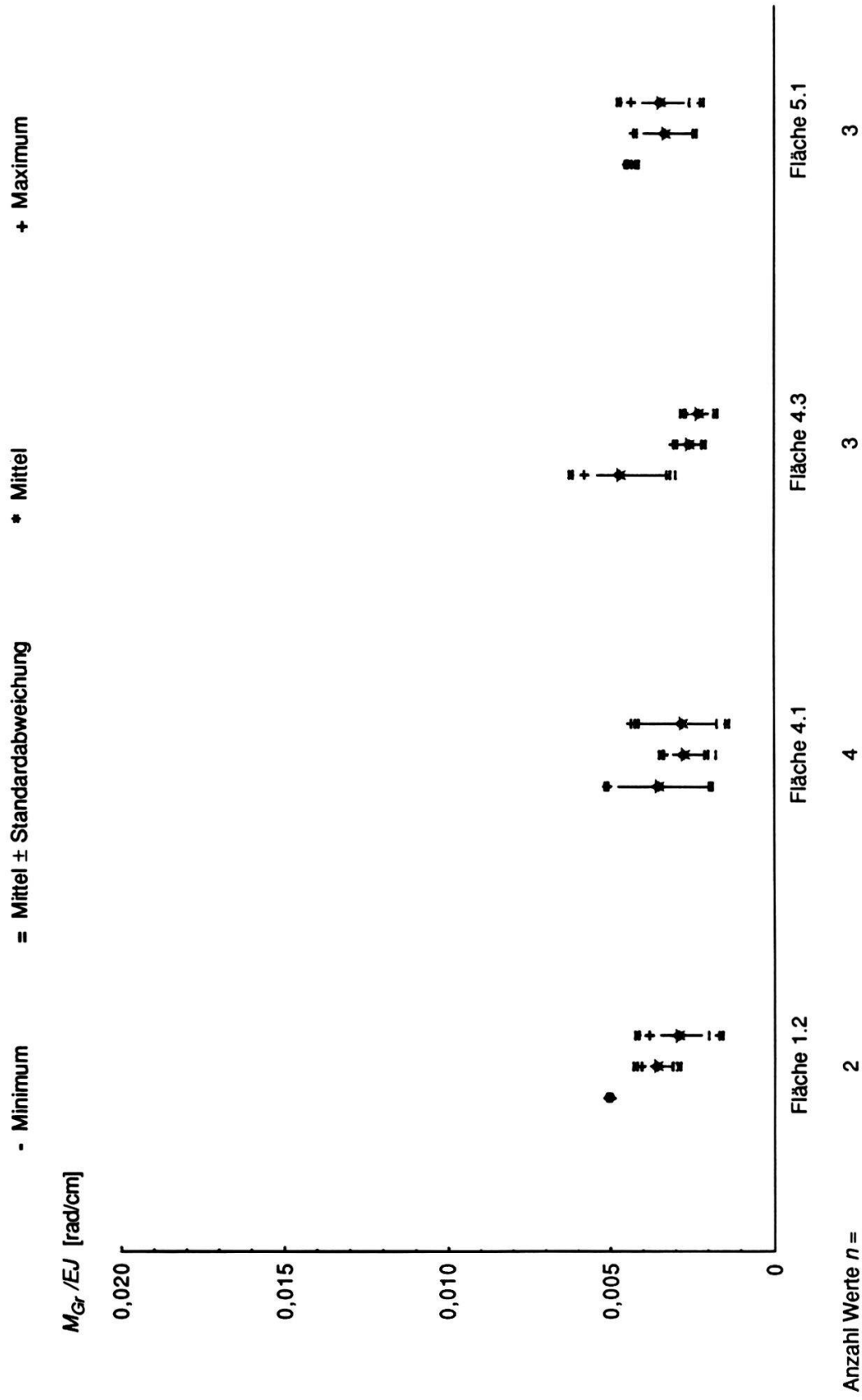


Fig. 3.43. Grenzkrümmung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 13. 6. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

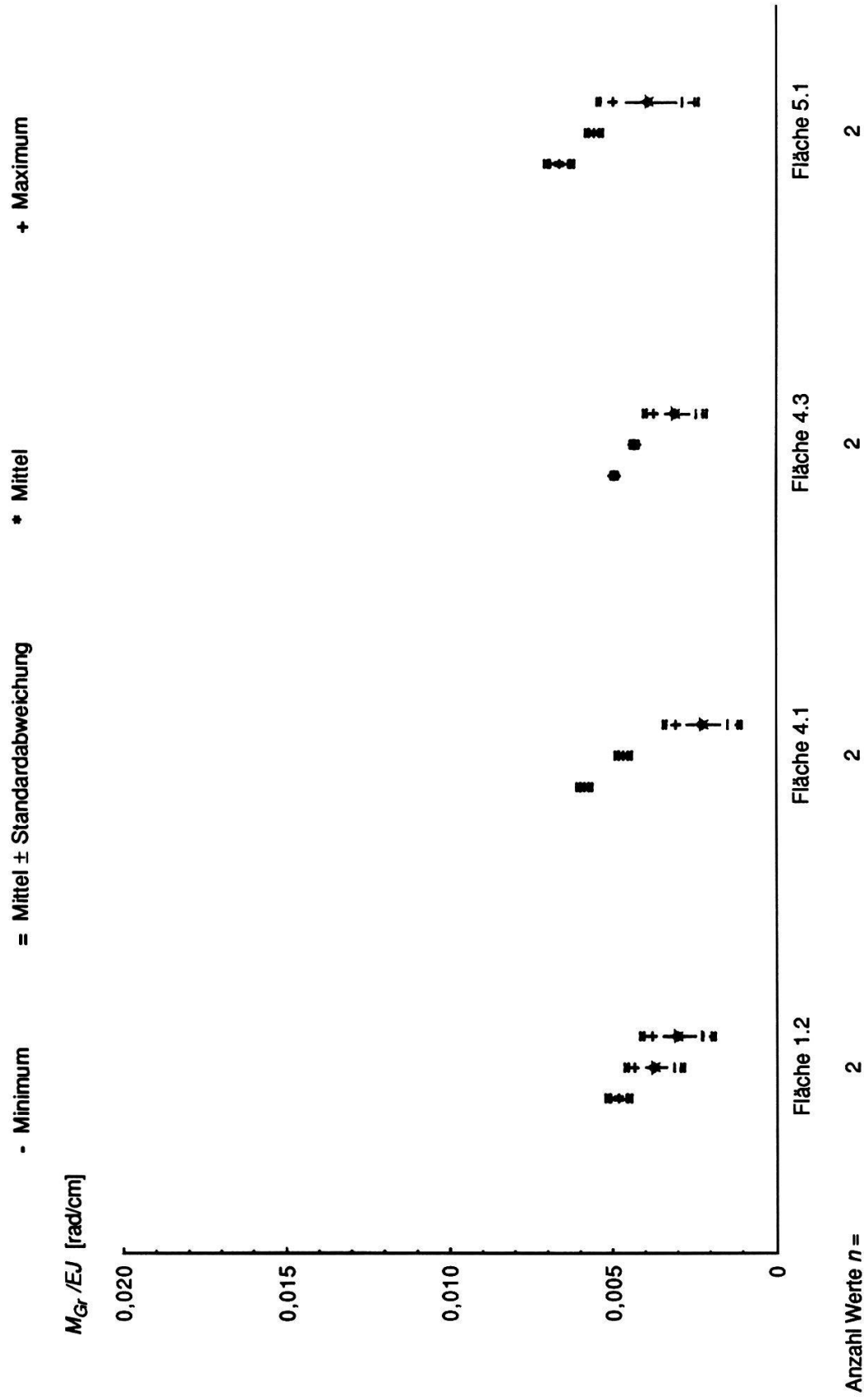


Fig. 3.44. Grenzkrümmung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 27. 6. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

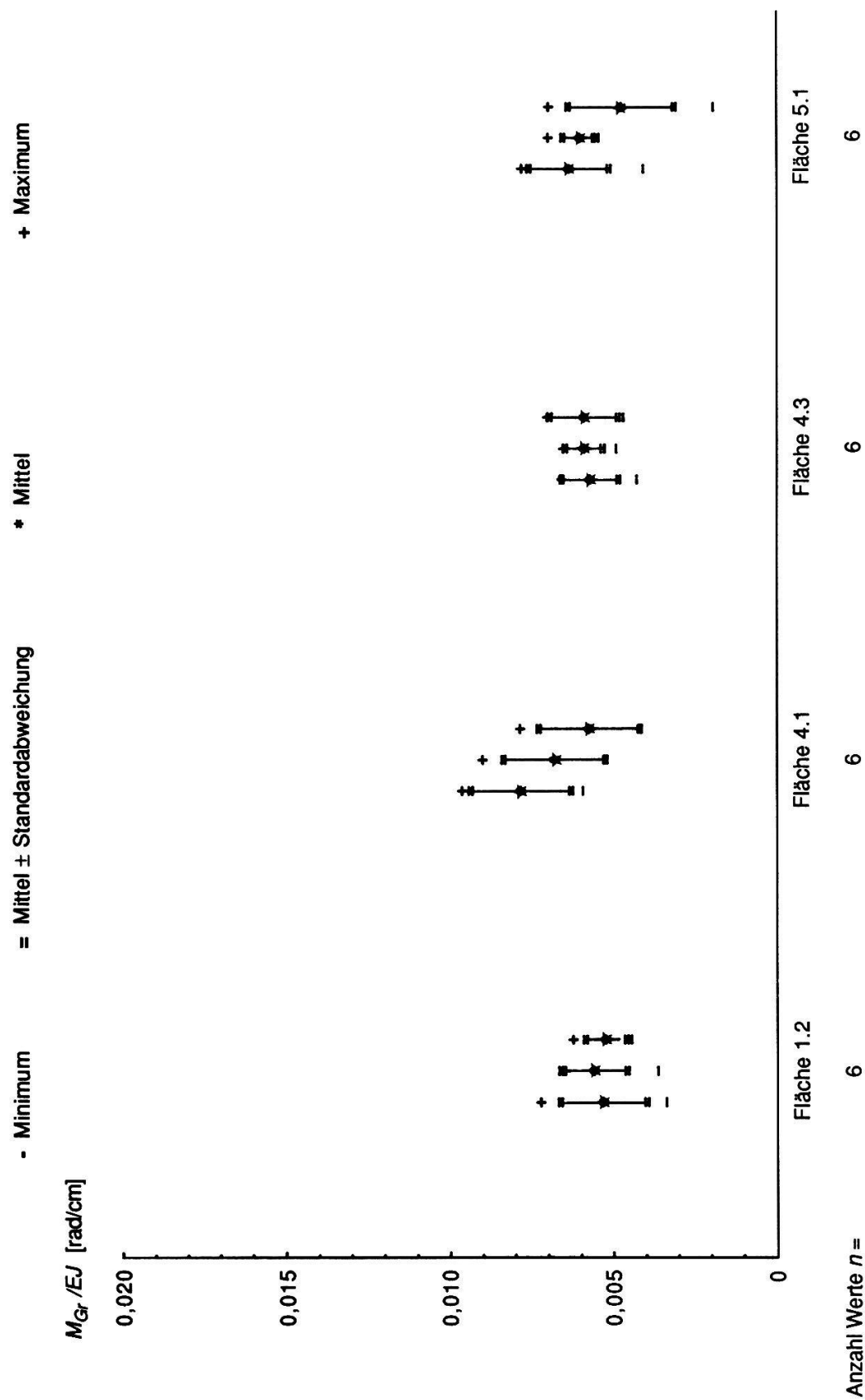


Fig. 3.45. Grenzkrümmung der geprüften Schilfhalm aus Altenrhein vom 23. 7. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

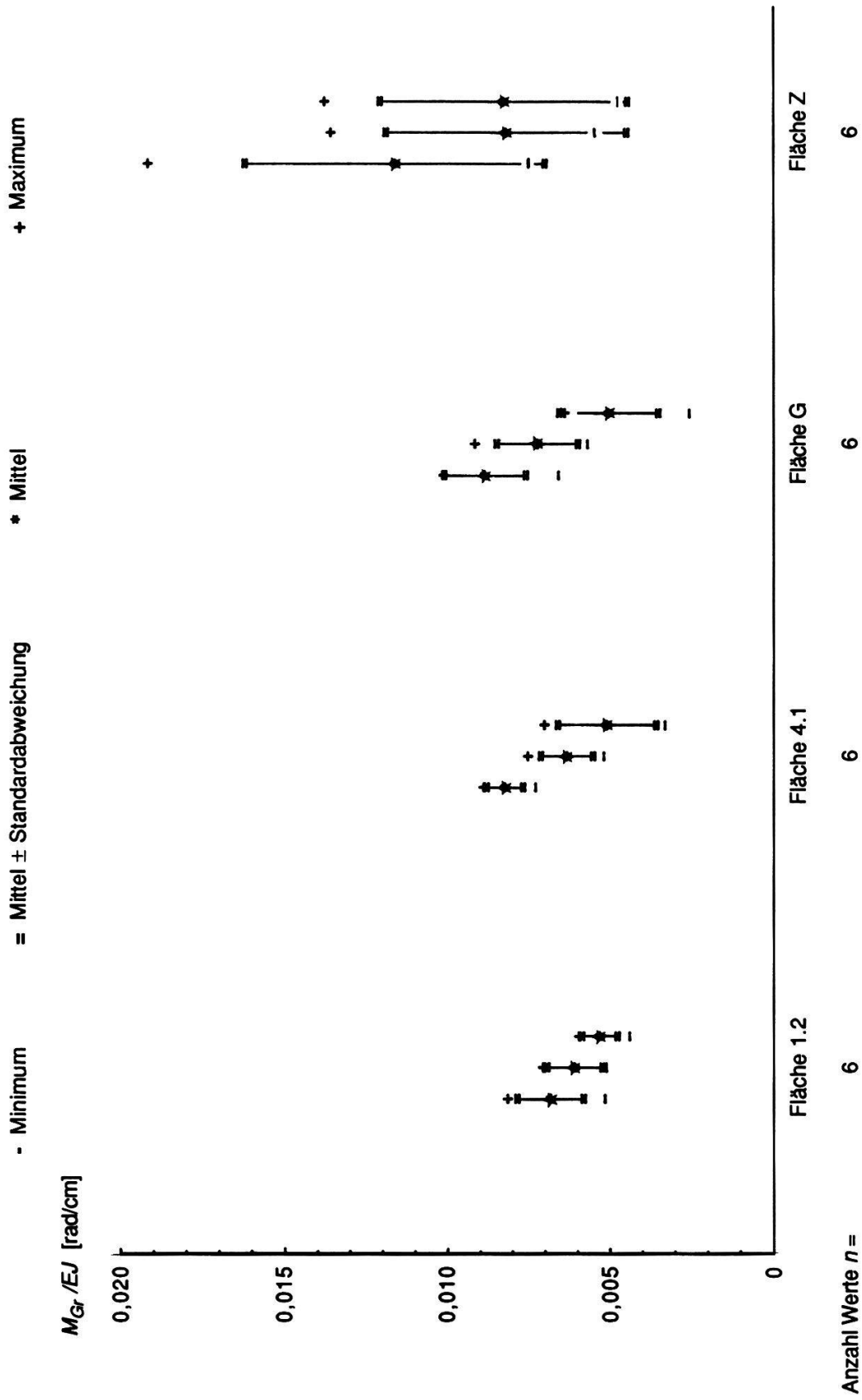


Fig. 3.46. Grenzkrümmung der geprüften Schilfhalme aus Altenrhein vom 12. 8. 79.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

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 Universität 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 nummerierten 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/m^3 , bzw. 1 g P/m^3 .
- 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/m^3 , bzw. 1 g P/m^3 .
- 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/m^3 , jener an Phosphor über 5 g P/m^3 .
- Fläche 5 liegt unmittelbar beim Abwassereinlauf. Die mittlere Belastung des Abwassers beträgt $77,5 \text{ g N/m}^3$ und $15,3 \text{ g P/m}^3$.

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.



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[!]).

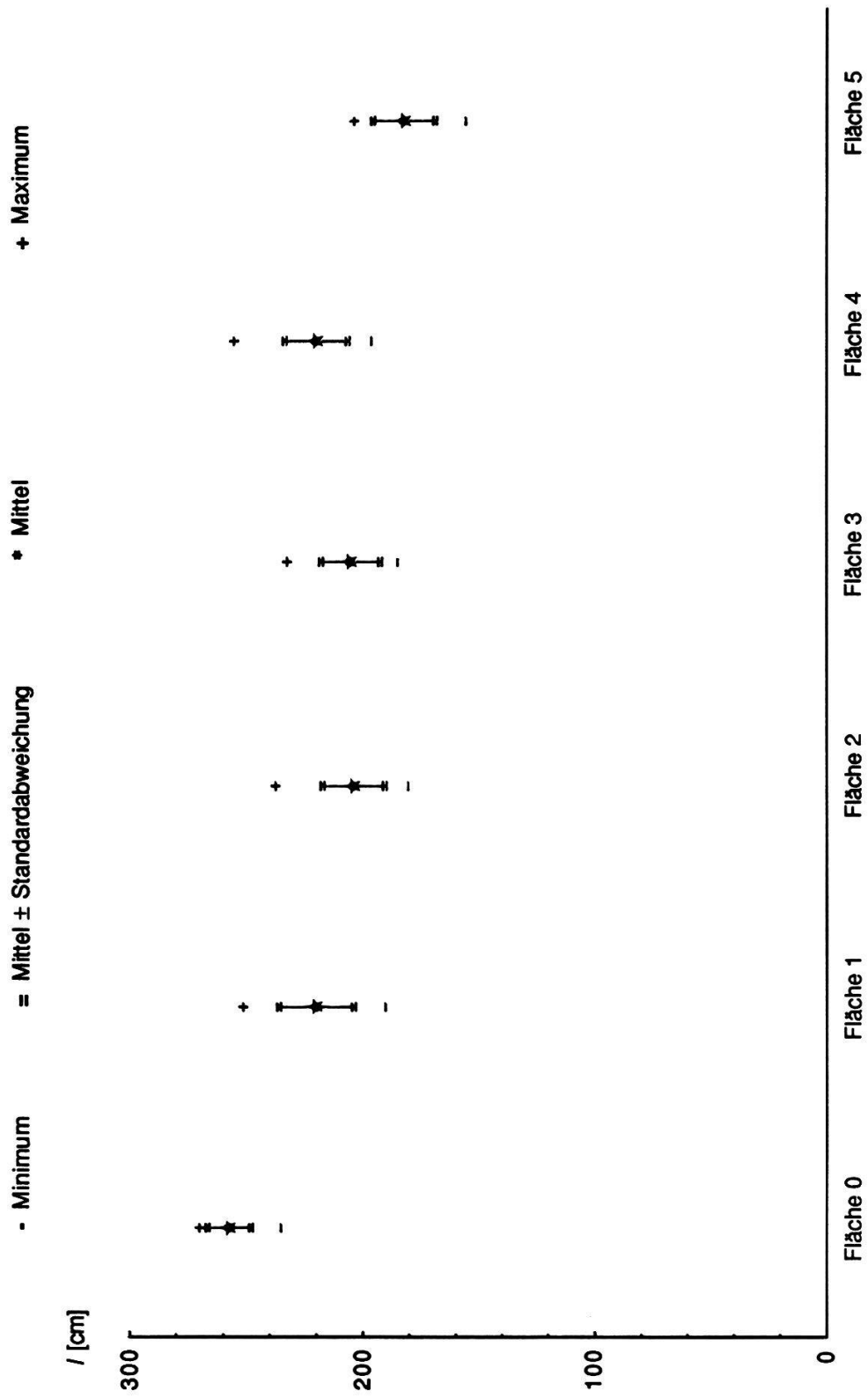


Fig. 3.49. Längen der für die Biegeversuche benützten Halme aus Othfresen.

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 EJ 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/cm²). 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 GRÜNIG 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 Gruppe 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 $1400 - 2000 \text{ N/cm}^2$ 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/cm^2 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 $0,08 - 0,05 \text{ rad/cm}$ gegenüber $0,07 - 0,09 \text{ rad/cm}$ 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 $E \cdot J$, 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	
Durchmesser [cm]												Stk.
0,66	0,53	0,54	0,55	0,50	0,53							1
0,81	0,75	0,72	0,68	0,70	0,64							
1,23	0,95	0,94	0,94	0,92	0,90							
0,70	0,54	0,53	0,51	0,48	0,49							2
0,82	0,75	0,71	0,65	0,66	0,58							
1,09	0,97	0,89	0,95	0,89	0,74							
0,62	0,48	0,59	0,45	0,38	-							3
0,77	0,70	0,70	0,61	0,55	-							
0,95	0,85	0,78	0,85	0,71	-							
Ideeller E-Modul [kN/cm ²]; r						EJ [N·cm ²]						Stk.
574	604	606	510	594	648	4981	2897	2993	2207	2361	2815	1
±37	±33	±42	±34	±30	±36	12179	9934	8231	5197	7213	5396	
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	2
±38	±41	±40	±45	±31	±52	12508	10549	8833	4743	6796	3848	
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		3
±41	±34	±64	±60	±25		10729	9082	8985	4290	4069		
r=-,78	-0,27	-0,89	-0,94	-0,11		20614	16168	13776	7808	9508		
Ideelle Bruchspannung [N/cm ²]; r						Bruchmoment [N·cm]						Stk.
3550	3707	3672	2706	3255	3282	88	48	59	35	43	44	1
±164	±151	±200	±168	±120	±183	188	162	141	83	113	86	
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	2
±126	±143	±183	±155	±117	±171	165	139	114	69	94	51	
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		3
±148	±127	±219	±219	±100		129	106	104	58	58		
r=-,72	0,09	-0,82	-0,85	0,46		204	174	151	104	120		
Ideelle Grenzspannung [N/cm ²]; r						Grenzmoment [N·cm]						Stk.
2032	2081	1960	1456	1875	1991	49	30	10	9	26	24	1
±108	±112	±181	±130	±73	±127	108	89	73	45	65	51	
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	2
±107	±92	±136	±104	±89	±141	99	83	68	38	58	28	
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		3
±118	±95	±235	±161	±70		79	68	59	35	36		
r=-,74	0,03	-0,71	-0,67	0,55		139	104	84	63	75		

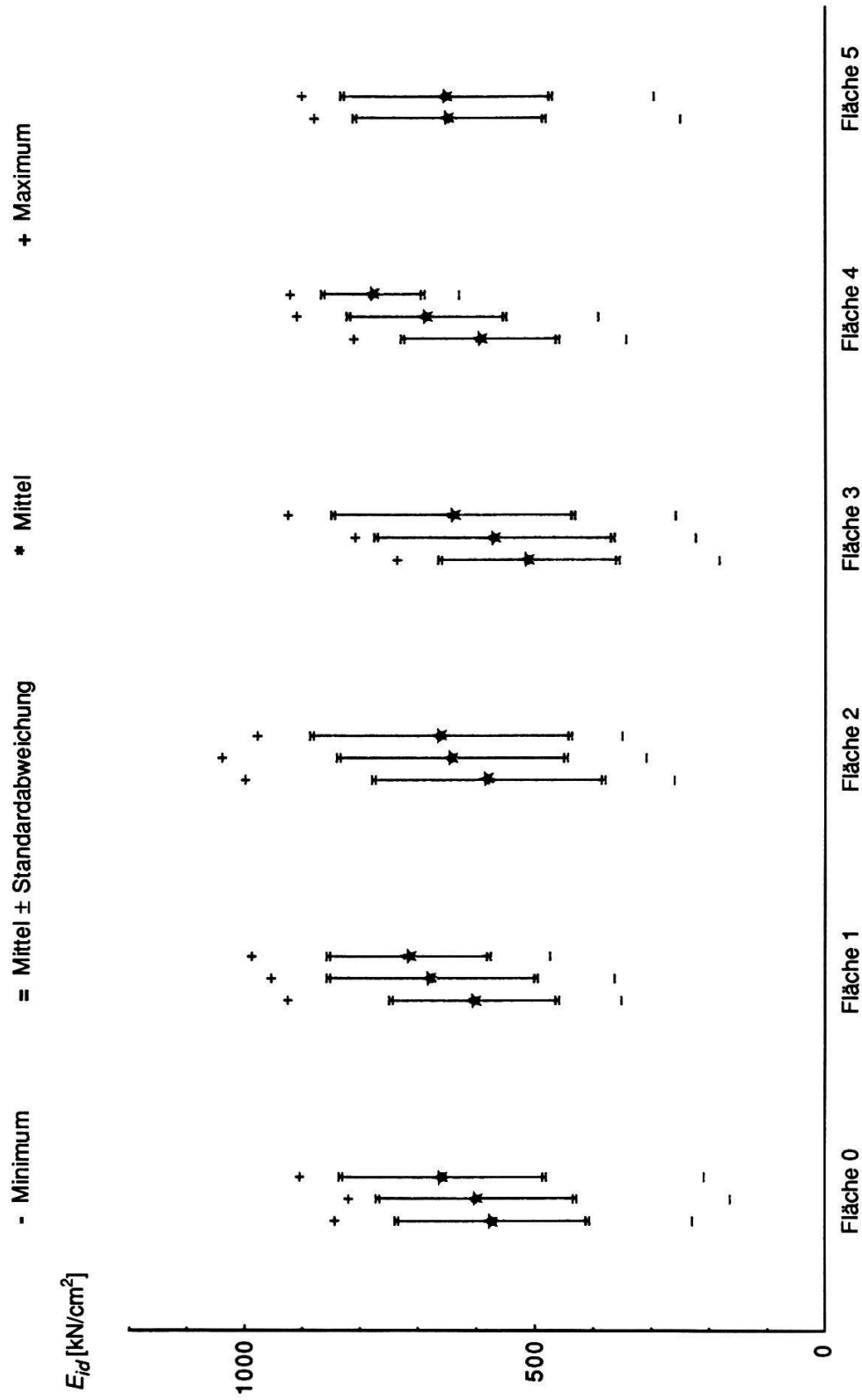


Fig. 3.50. Ideeller E-Modul der im Labor geprüften Schilfhalm aus Ohrfresen.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

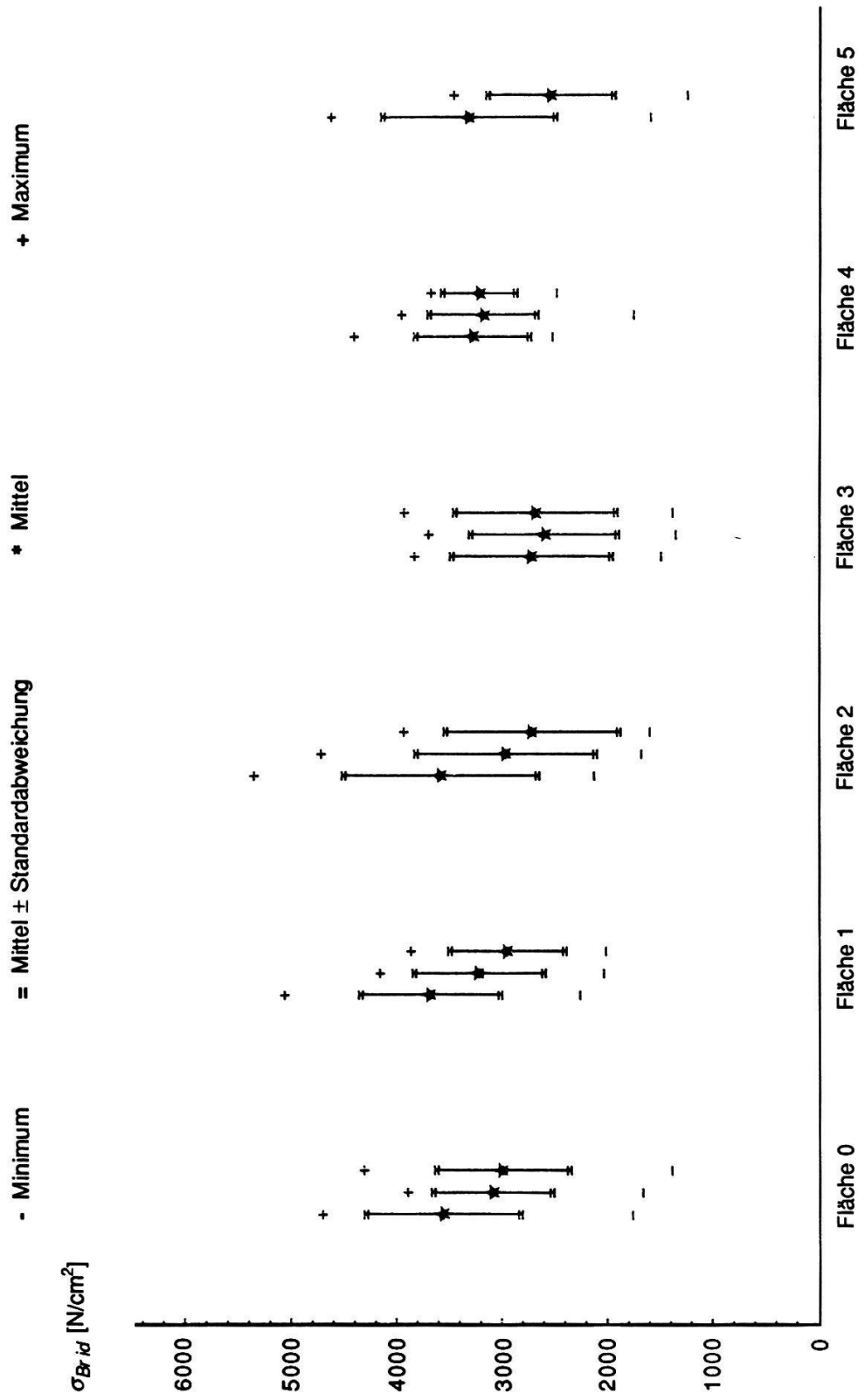


Fig. 3.51. Ideale Bruchspannung der im Labor geprüften Schilfhalme aus Othfresen.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

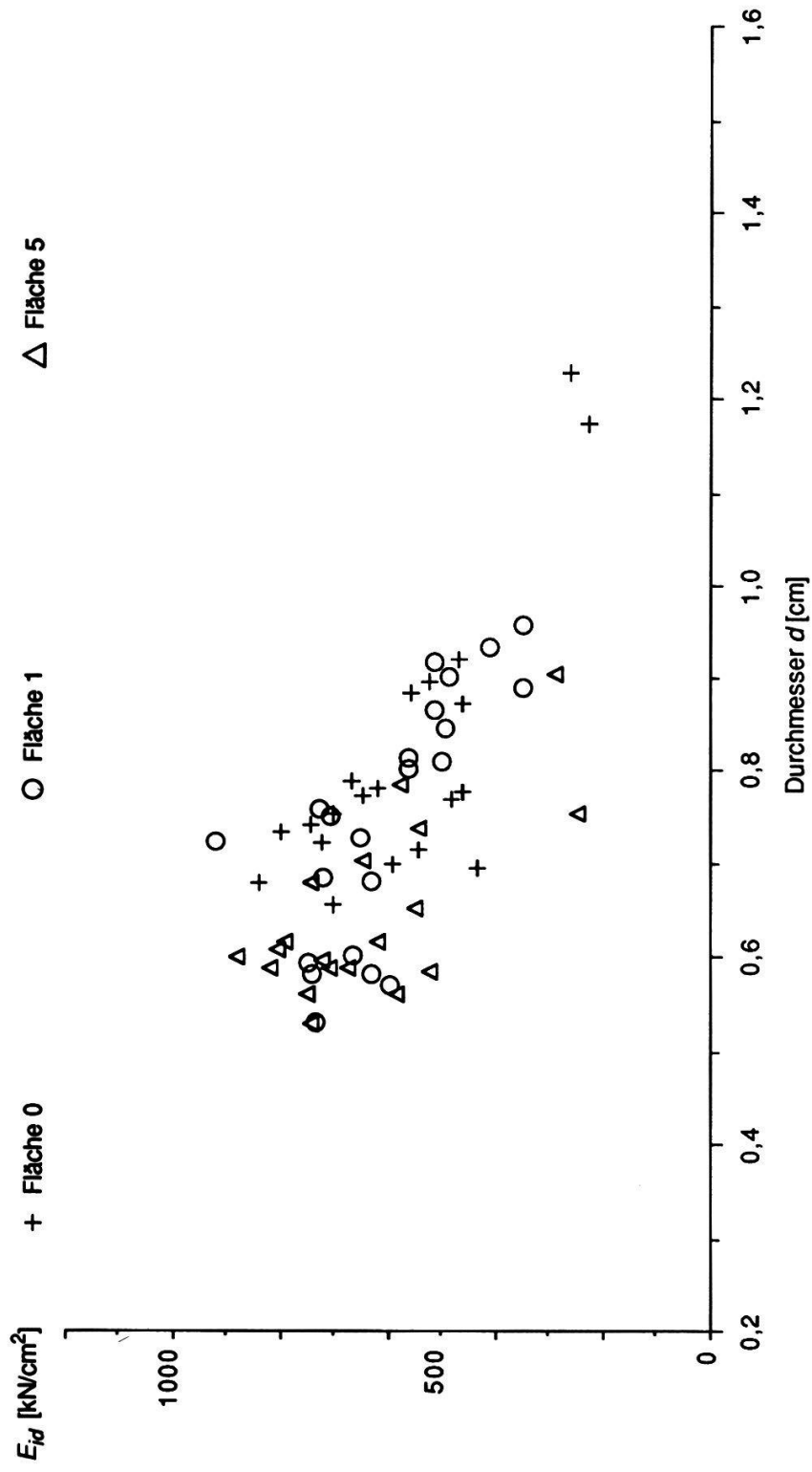


Fig. 3.52. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, **unterste Stücke.** Flächen 0, 1 und 5

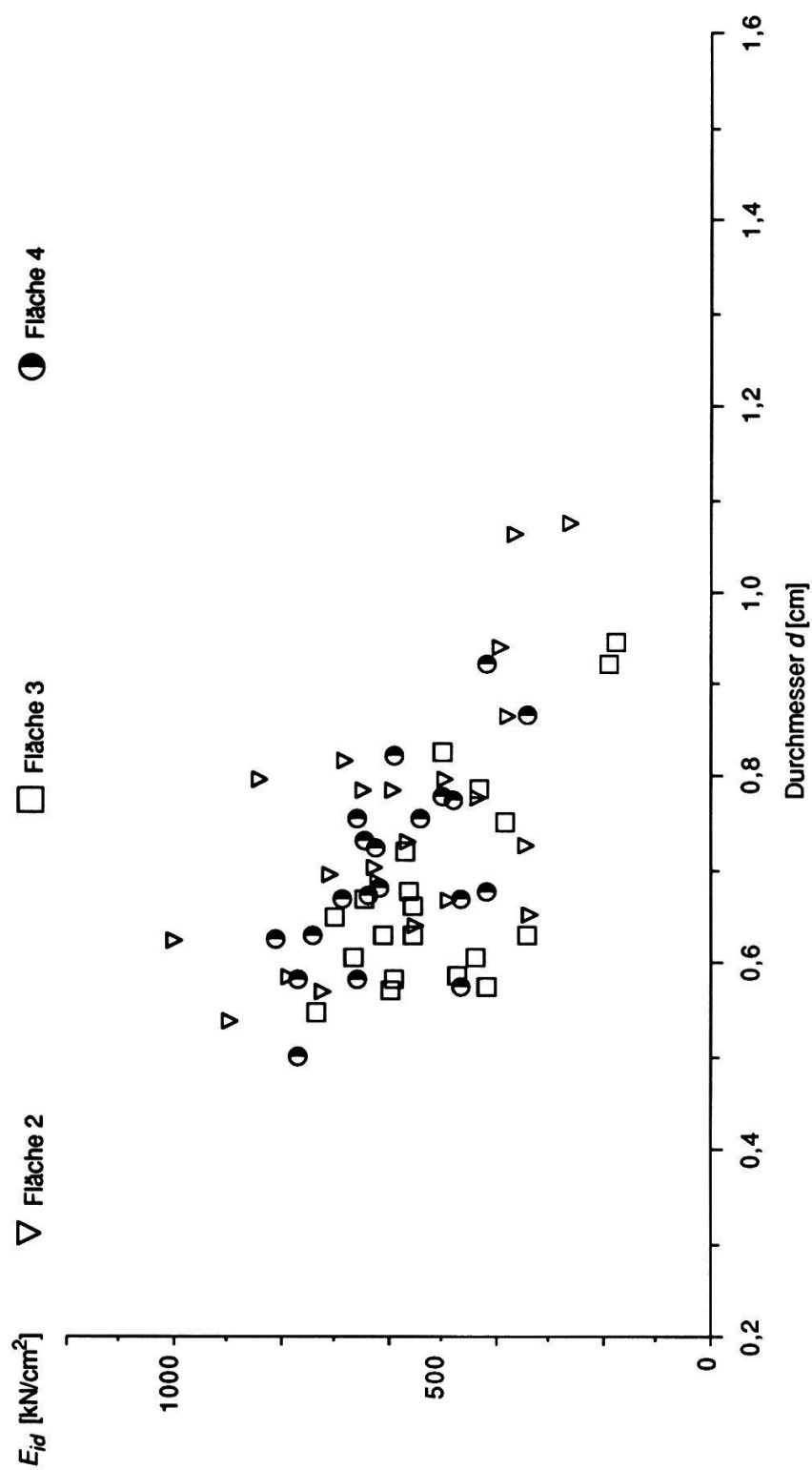


Fig. 3.52. (Forsetzung)
Flächen 2, 3 und 4

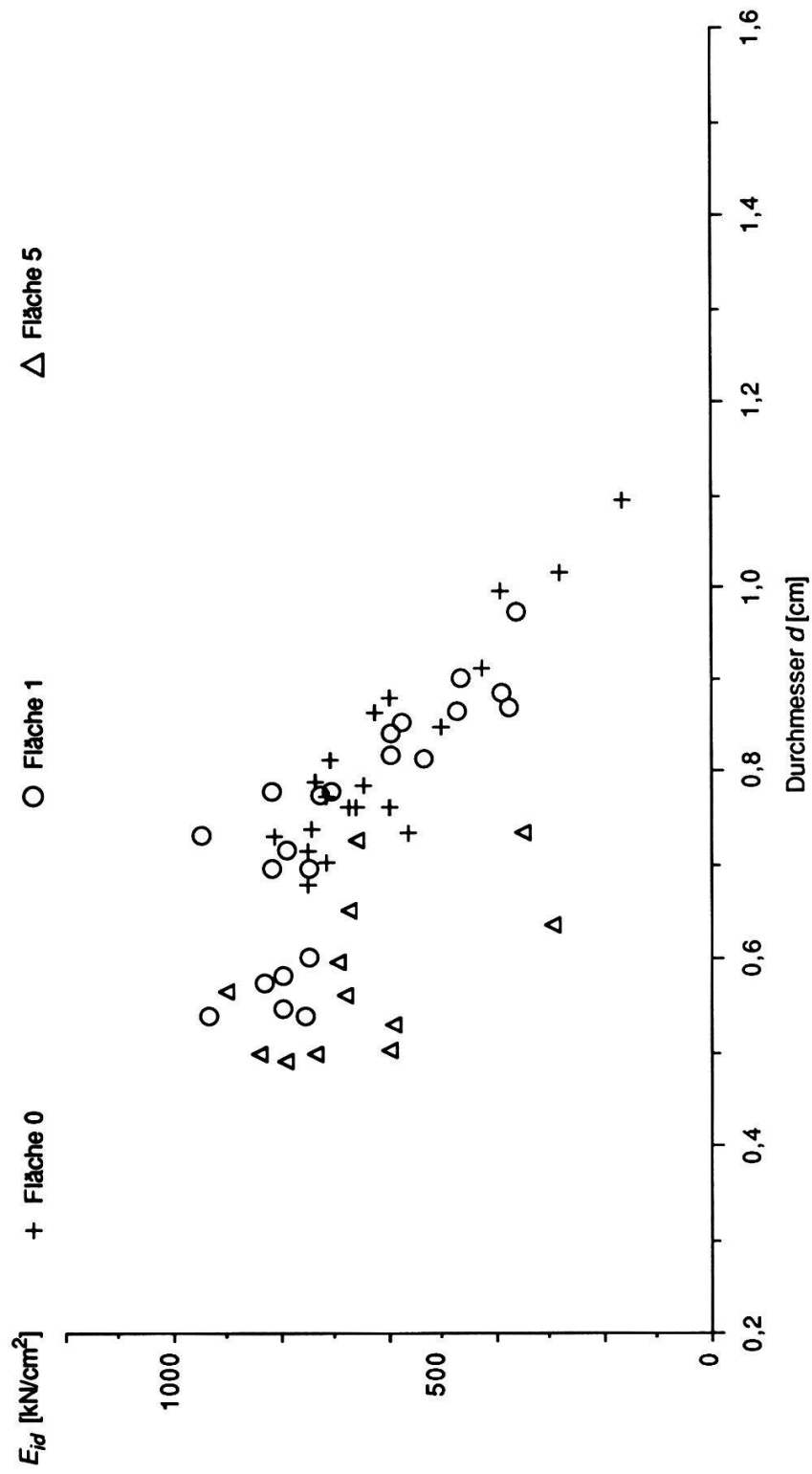


Fig. 3.53. Ideeller E-Modul der geprüften Schilfhälme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5

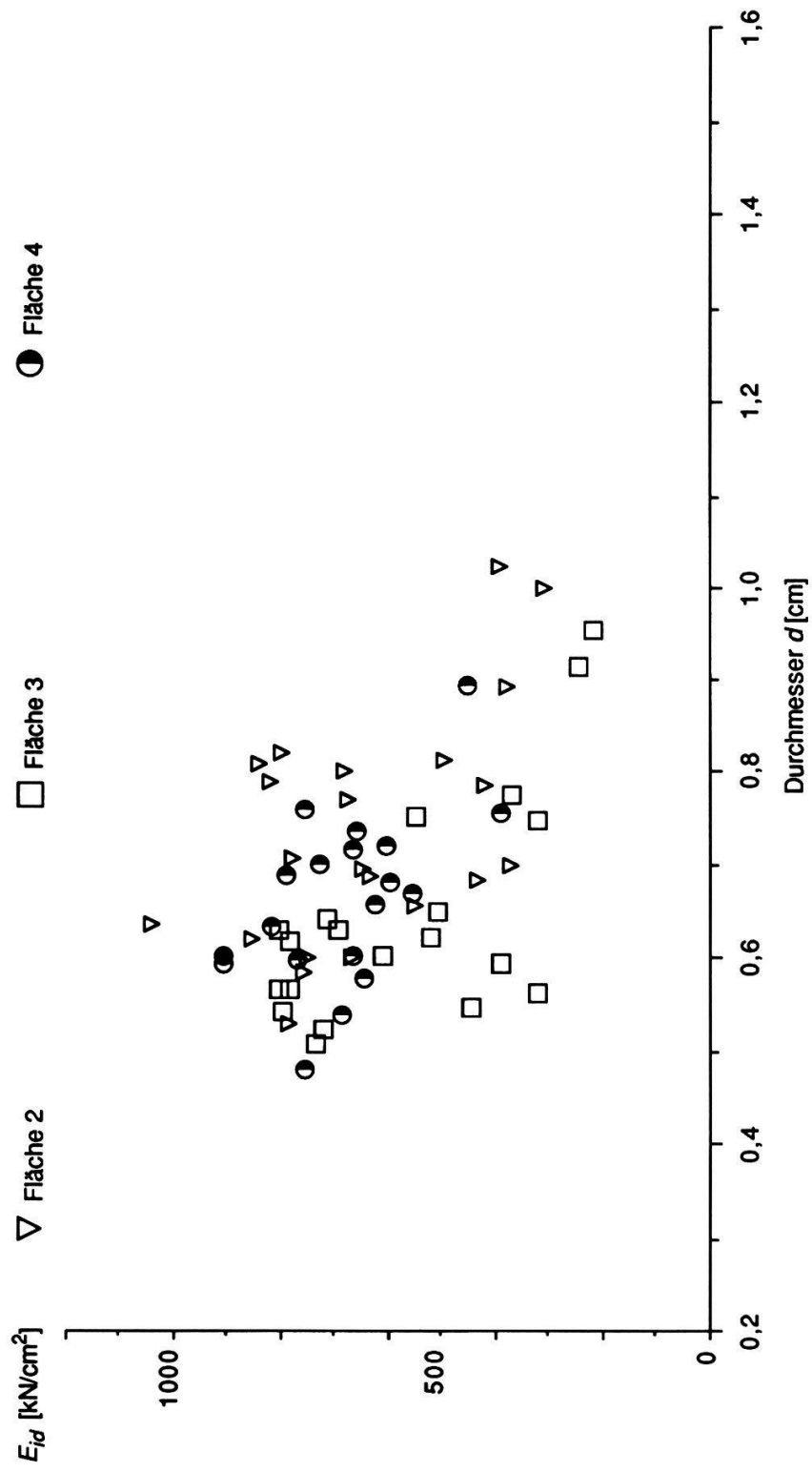


Fig. 3.53. (Fortsetzung)
Flächen 2, 3 und 4

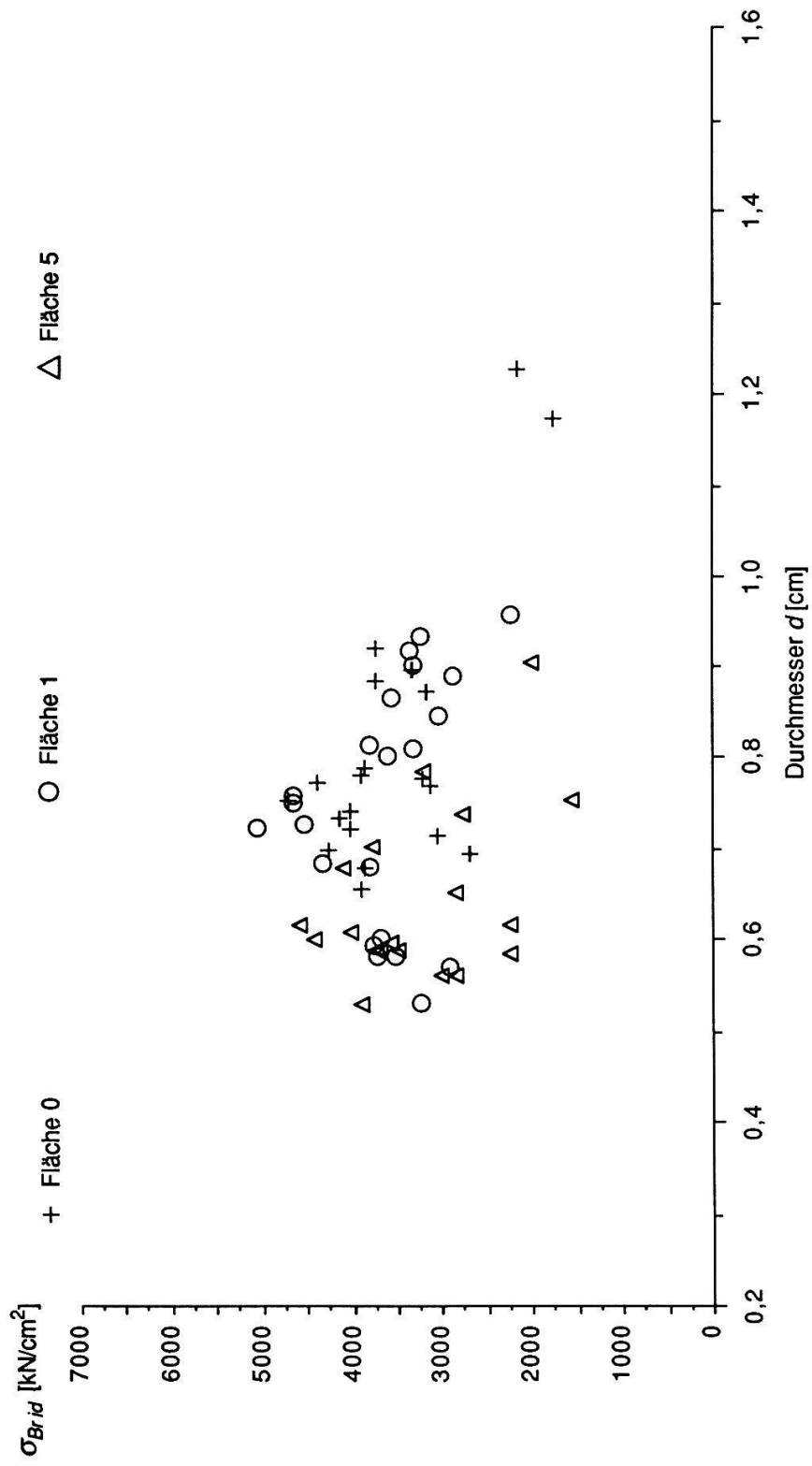


Fig. 3.54. Ideelle Bruchspannung der Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, unterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5

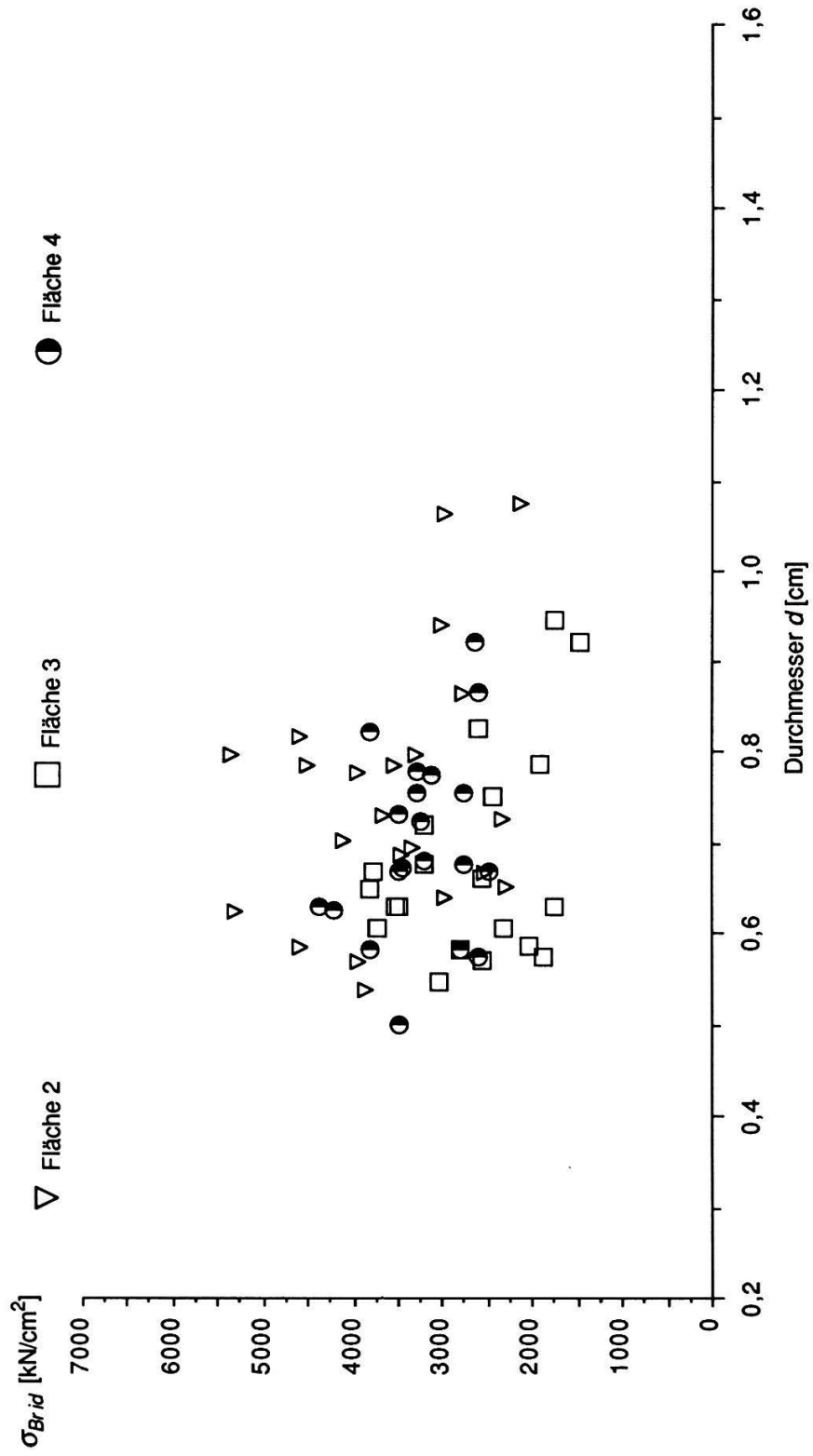


Fig. 3.54. (Fortsetzung)
Flächen 2, 3 und 4

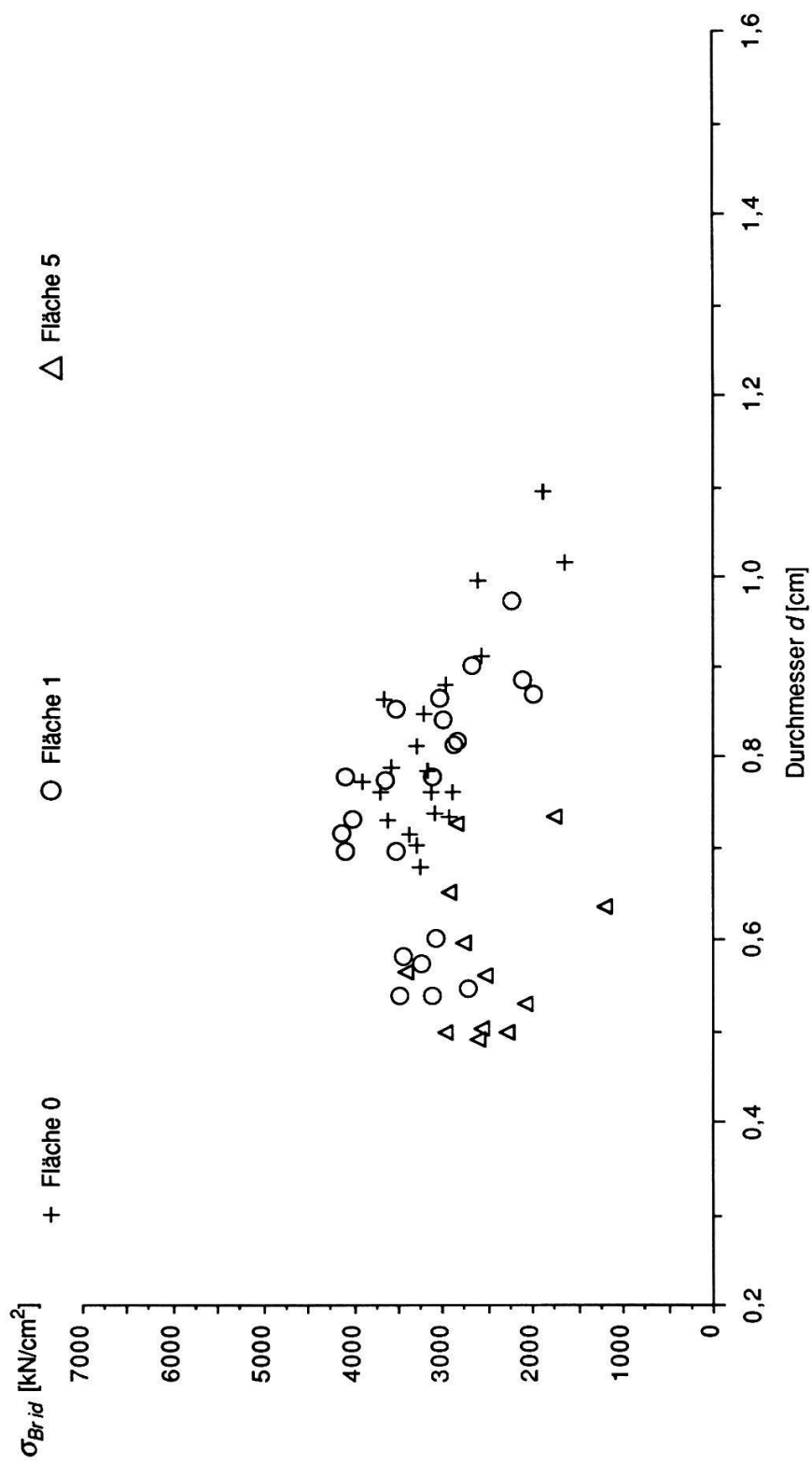


Fig. 3.55. Ideale Bruchspannung der Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5

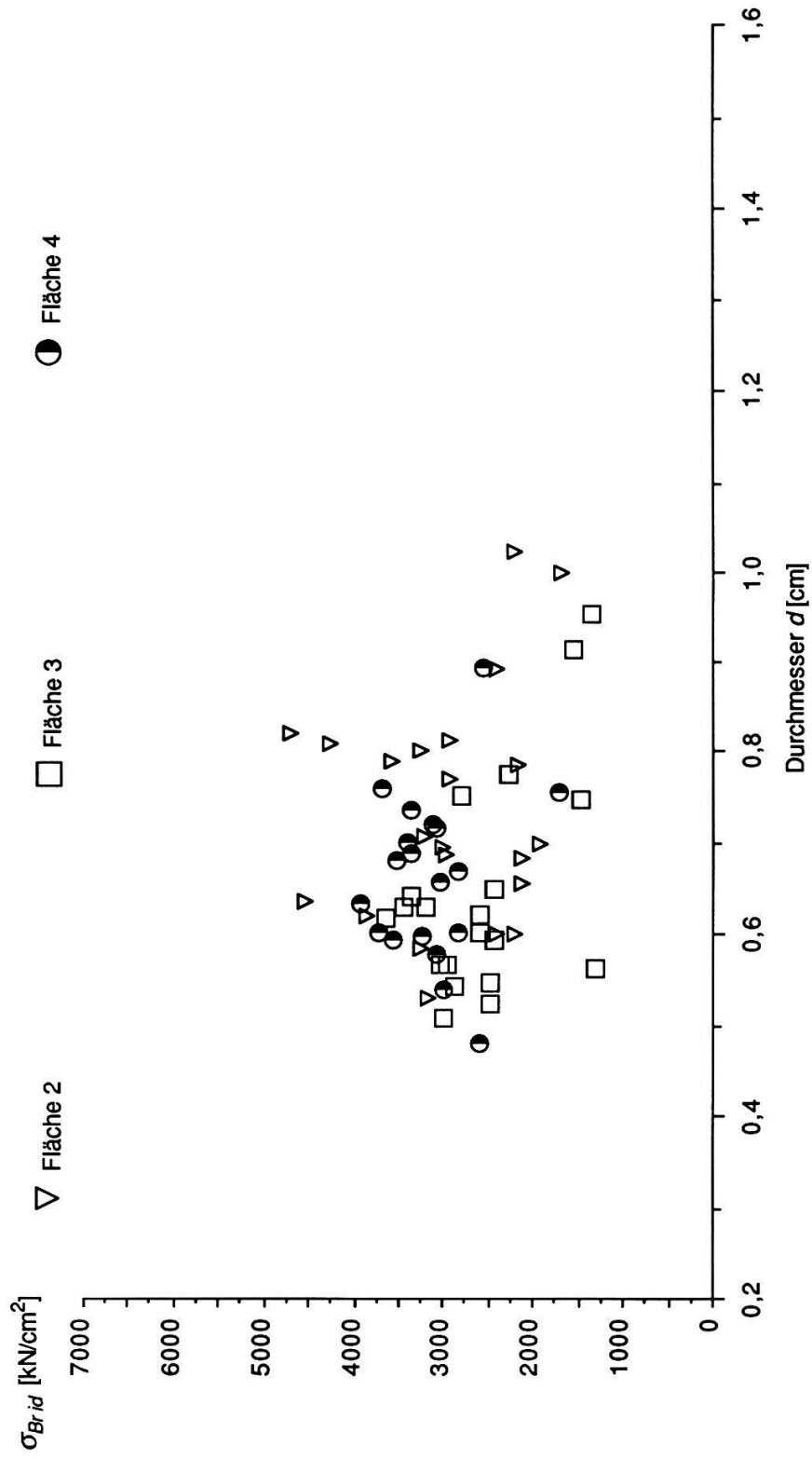


Fig. 3.55. (Fortsetzung)
Flächen 2, 3 und 4

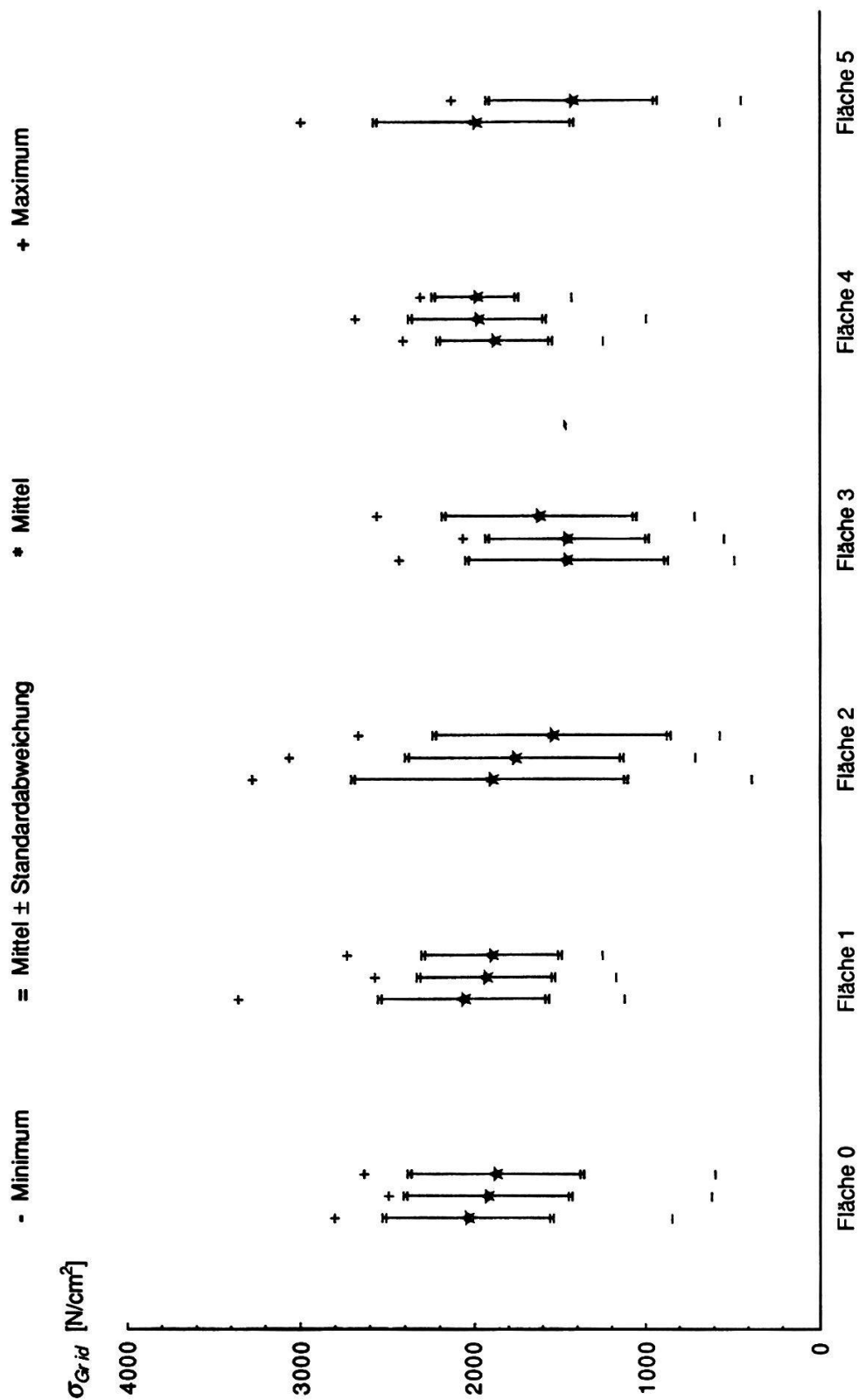


Fig. 3.56. Ideale Grenzspannung der im Labor geprüften Schilfhalm aus Othfresen.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

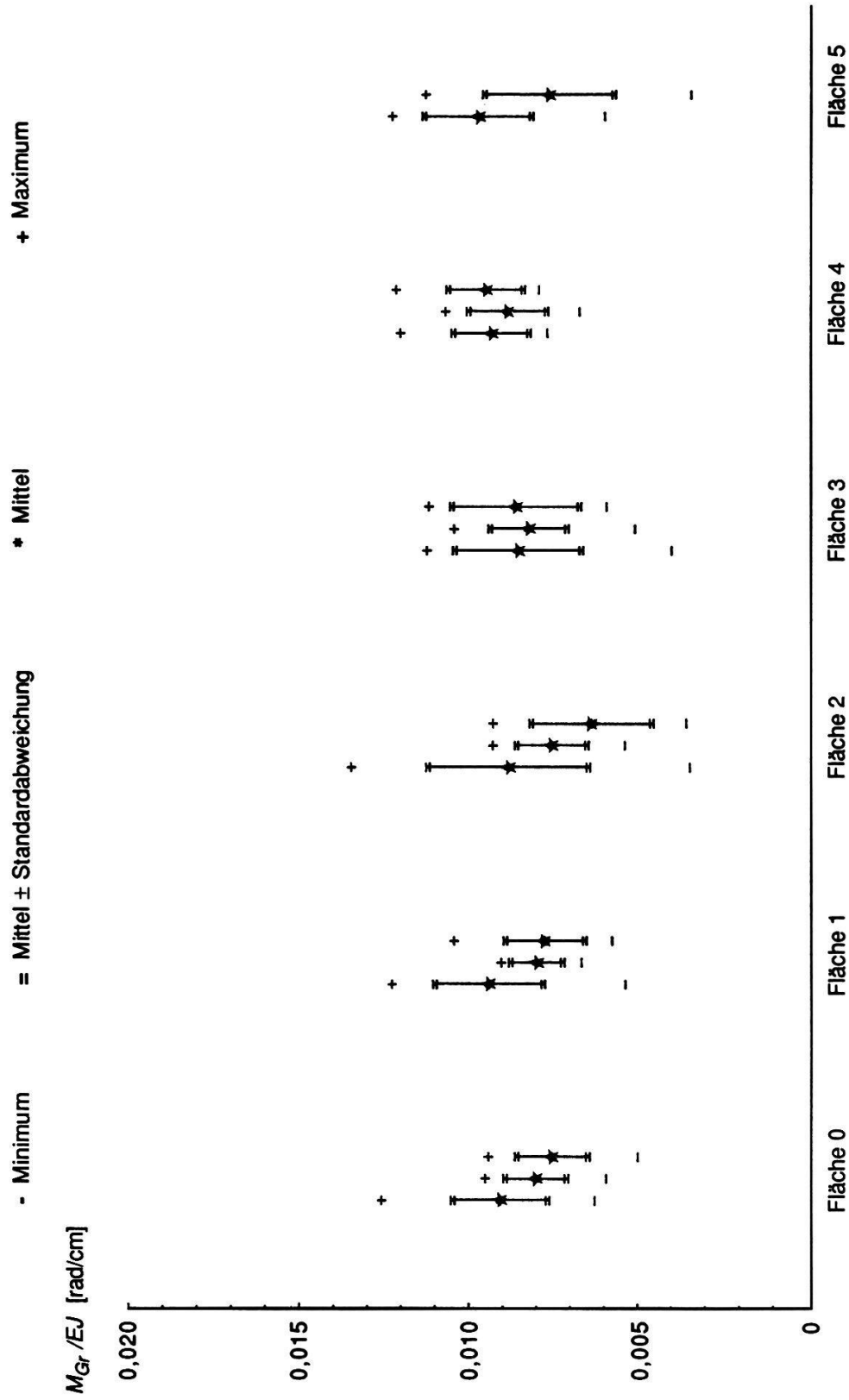


Fig. 3.57. Grenzkrümmung der im Labor geprüften Schilfhalme aus Othfresen.
Bei jeder Fläche von links nach rechts: Unterste, zweitunterste und drittunterste Stücke.

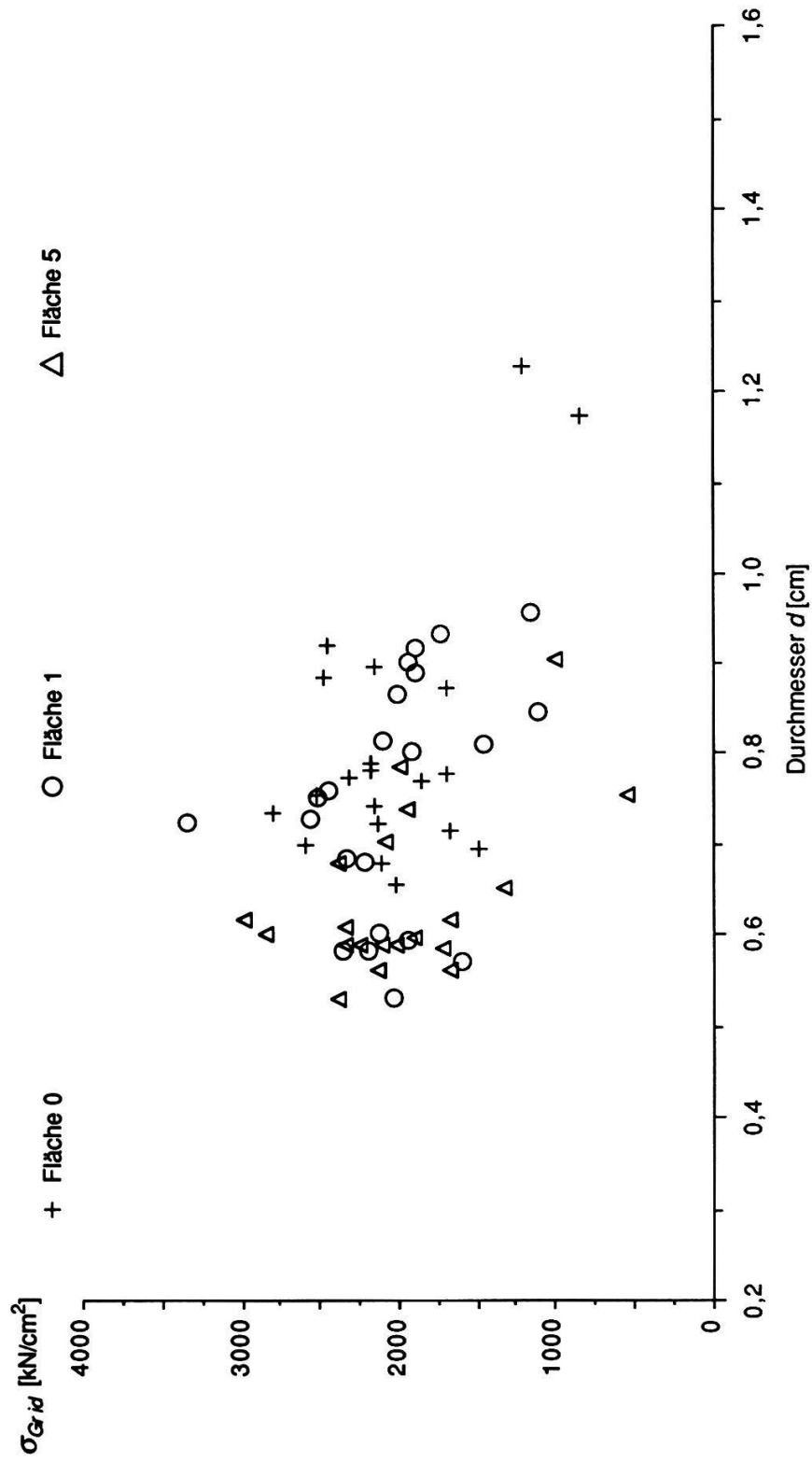


Fig. 3.58. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, unterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5

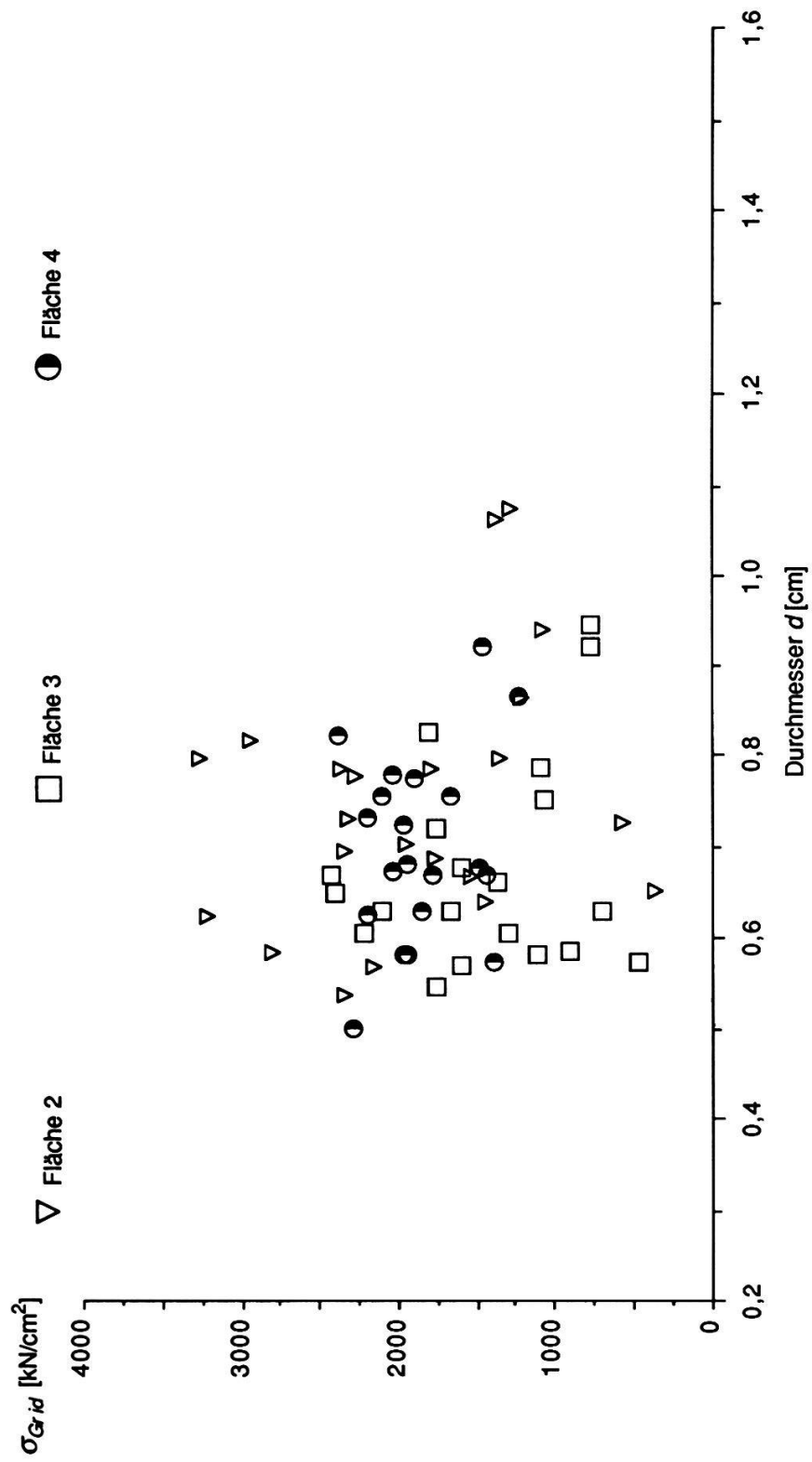


Fig. 3.58. (Fortsetzung)
Flächen 2, 3 und 4

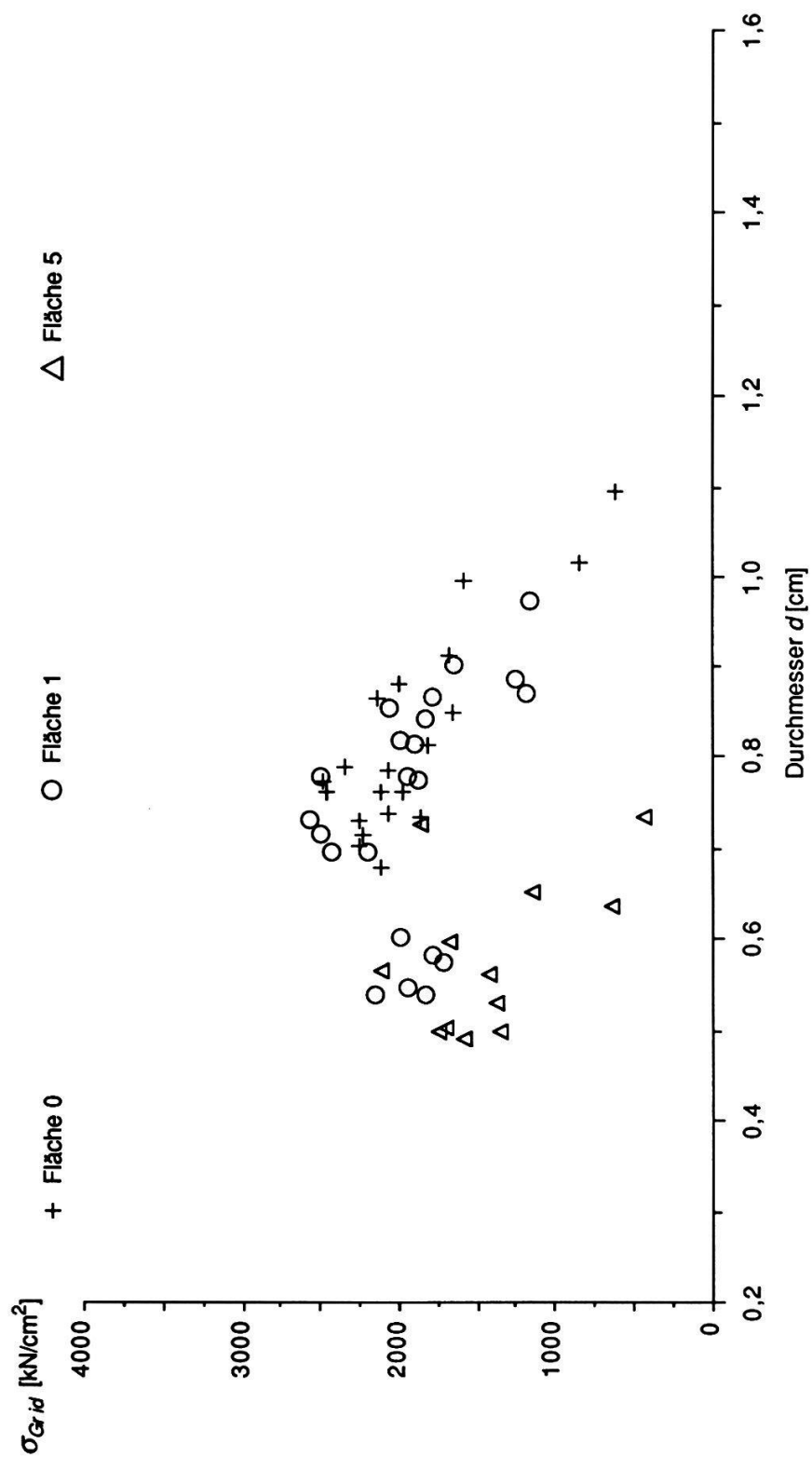


Fig. 3.59. Ideelle Grenzspannung der Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5

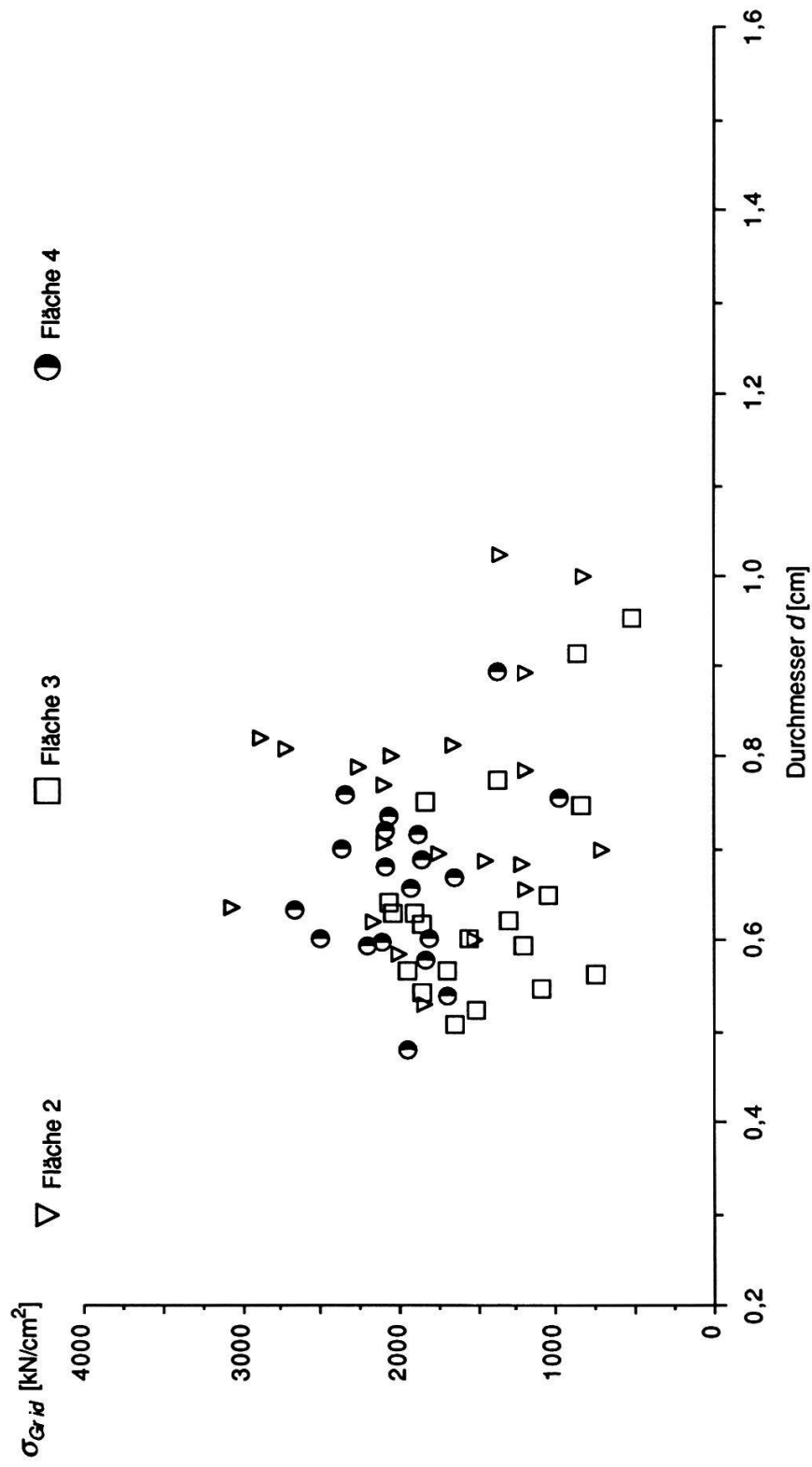


Fig. 3.59. (Fortsetzung)
Flächen 2, 3 und 4

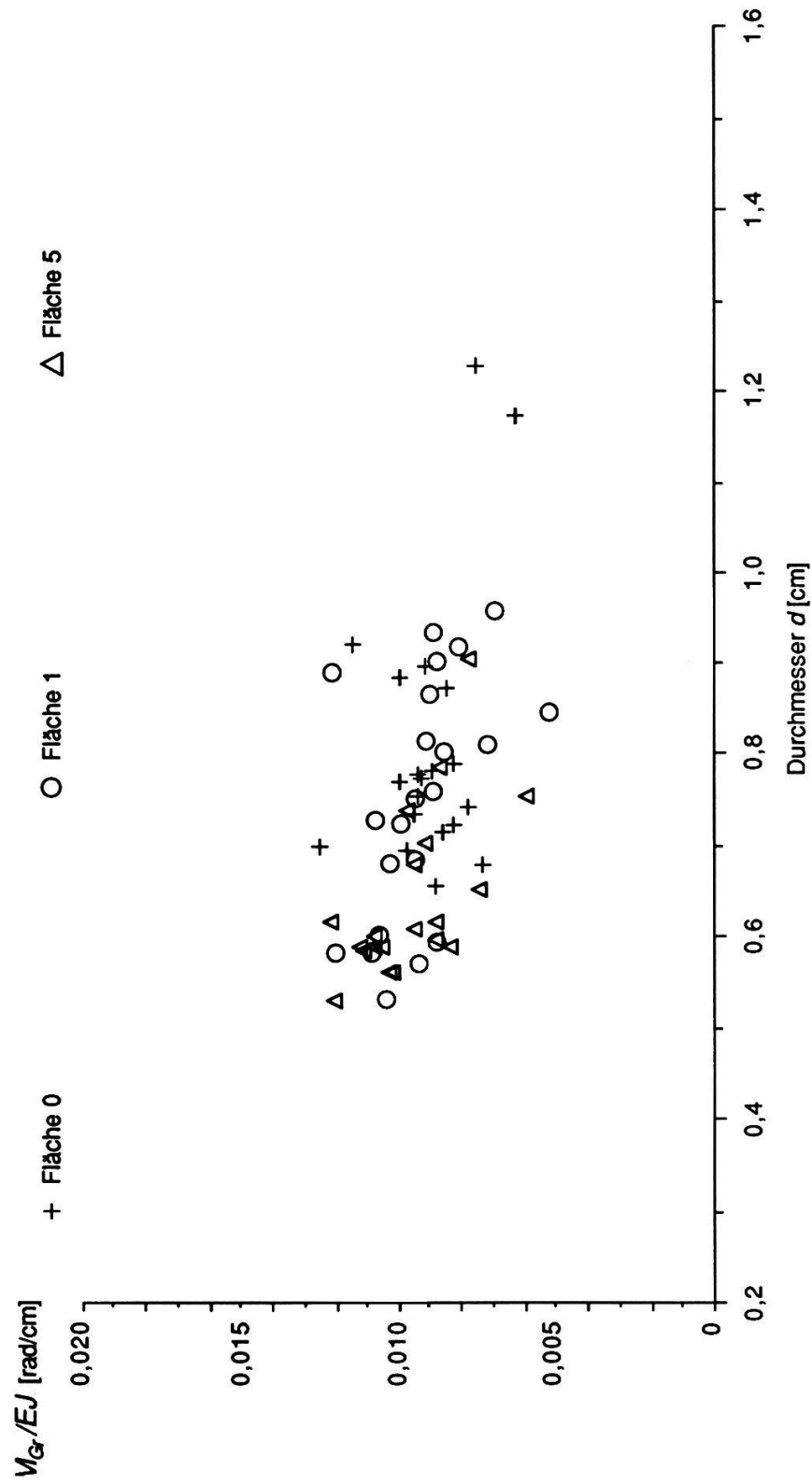


Fig. 3.60. Grenzkrümmung der Schilfhalm aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, **unterste Stücke.** Flächen 0, 1 und 5

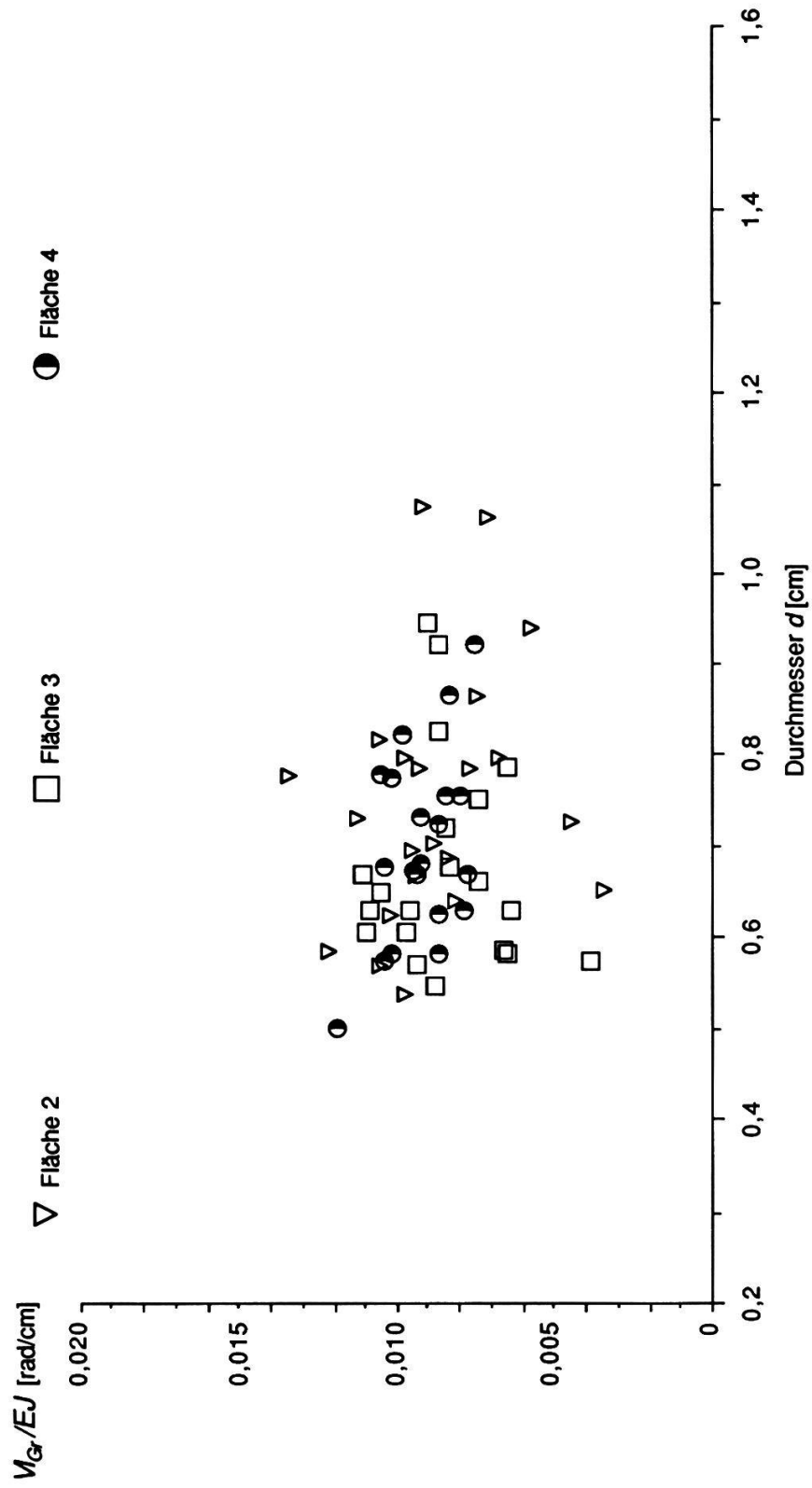


Fig. 3.60. (Fortsetzung)
Flächen 2, 3 und 4

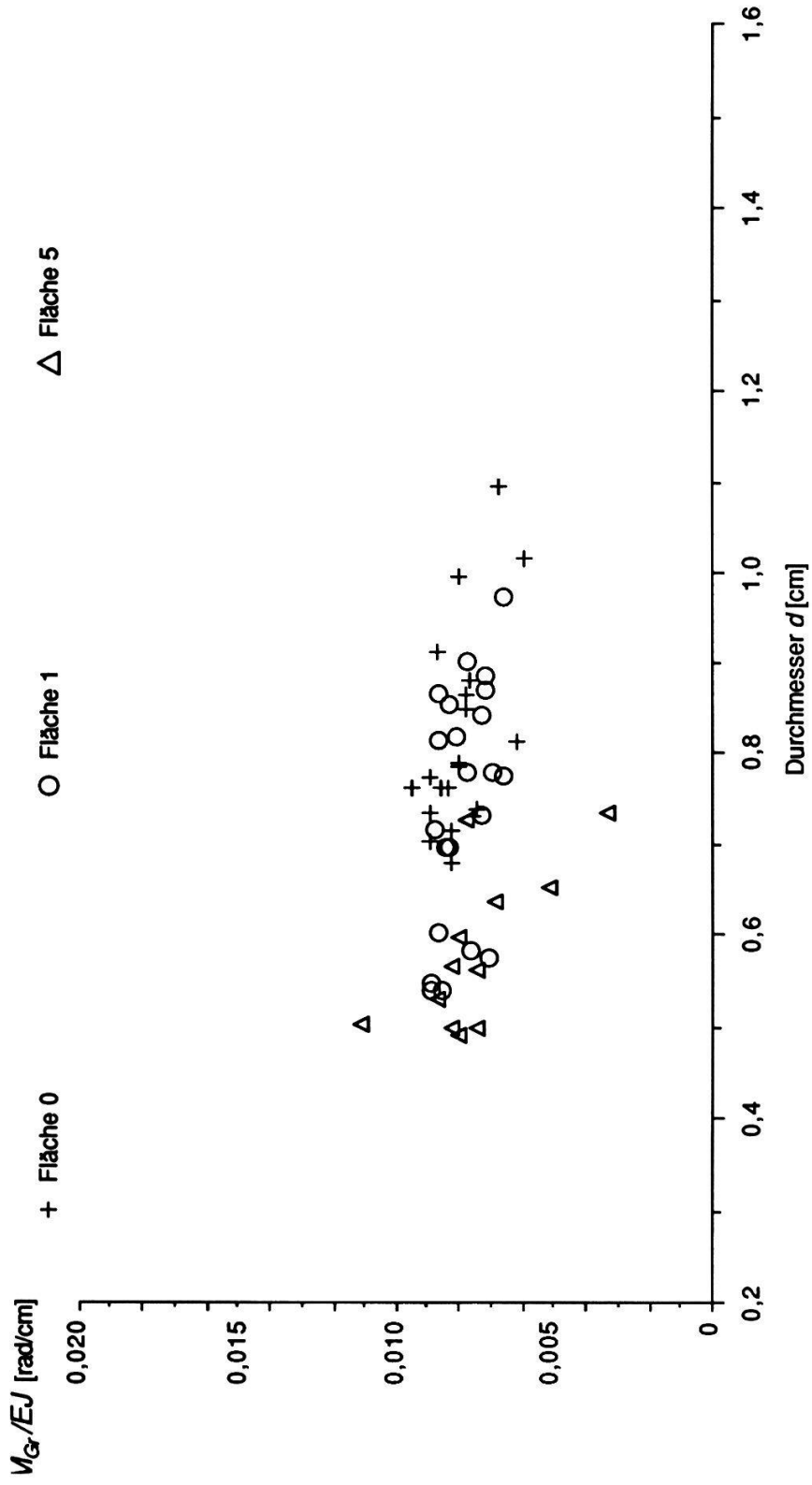


Fig. 3.61. Grenzkürmmung der Schilfhalme aus Othfresen in Funktion des Durchmessers, zweitunterste Stücke. Flächen 0, 1 und 5

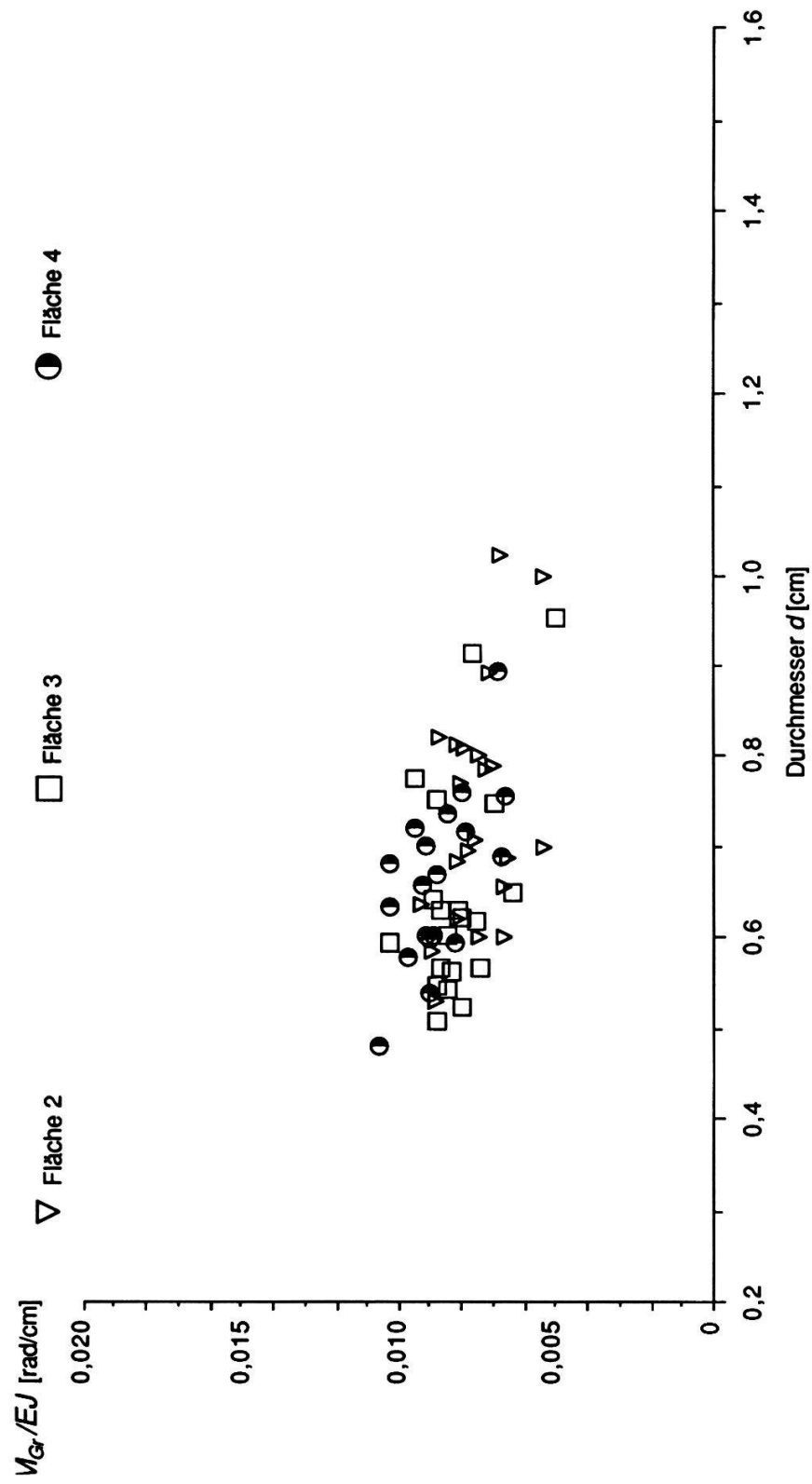


Fig. 3.61. (Fortsetzung)
Flächen 2, 3 und 4