**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 : Versuche zur Bestimmung des Einspannungsgrades im Feld

**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:** 09.09.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# 5. VERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DES EINSPANNUNGSGRADES IM FELD

## 5.1. ALLGEMEINES

Die Schilfhalme sind mit den Rhizomen und Wurzeln im Erdreich verankert. Weder dieses noch jene sind starr, sondern verformen sich unter der Einwirkung einer Belastung ("elastische Einspannung"). In unserem Fall handelt es sich bei der Belastung am Halmfuß um eine Horizontalkraft und ein Biegemoment (Einspannmoment). Während der Einfluß der Horizontalkraft (Verschiebung des Halmfußes) vernachlässigbar ist, muß die durch das Einspannmoment bewirkte Verdrehung des Halmfußes sehr wohl berücksichtigt werden, da schon ein kleiner Drehwinkel in einiger Entfernung (z.B. auf der Höhe des Wasserspiegels) eine beträchtliche Verschiebung zur Folge hat (Fig. 5.1.).
Das Verhältnis zwischen dem Einspannmoment $M_E$ und dem dadurch verur-

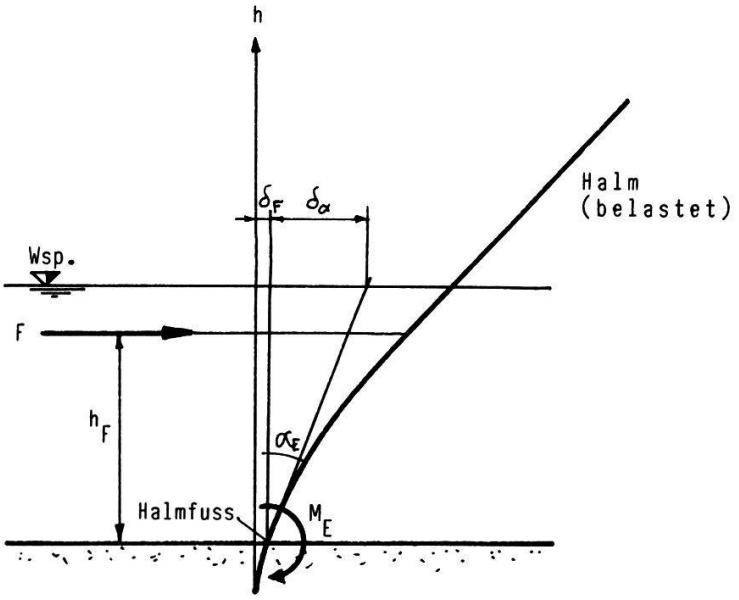


**Fig. 5.1.** Durch die Nachgiebigkeit am Halmfuß (elastische Einspannung) bewirkte Verschiebung in der Höhe des Wasserspiegels bei Belastung mit einer Horizontalkraft $F$.
$M_E$ = $h_F \cdot F$ = Einspannmoment infolge der Kraft $F$
$\alpha_E$ = Verdrehungswinkel des Halmfußes
$\delta_F$ = Verschiebung infolge der Horizontalkraft $F$
$\delta_\alpha$ = Verschiebung infolge der Verdrehung des Halmfußes

sachten Drehwinkel $\alpha_E$ des Halmfußes wird **Einspann(ungs)grad** $c_E$ genannt:

$$c_E = \frac{M_E}{\alpha_E} \qquad [\text{N·m/rad}] \qquad (5.1)$$

Der Einspanngrad kann naturgemäß nur im Felde (an aufrechten Halmen) gemessen werden. Da Unterwassermessungen umständlich und sehr aufwendig sind, wurden die Versuche im Versuchsfeld Altenrhein am Bodensee im November 1977 durchgeführt, als der Bestand trocken lag. Die Messungen erfolgten im Sektor D* (für die genaue Lokalisierung vgl. Fig. 3.6.) je an einem Ort im Innern des Bestandes und bei der seeseitigen Front.

## 5.2. VERSUCHSANORDNUNG

Die zu untersuchenden Halme unterwarfen wir einer ungefähr 60 cm über Grund wirkenden, waagrechten Kraft, welche wir jeweils stufenweise um je 100 p (0,981 N) steigerten. Sobald sich der Halm nicht mehr bewegte, wurden die Verschiebungen in drei festgelegten Höhen über dem Boden sowie unmittelbar auf dem Boden gemessen. Das Versuchsgerät (Fig. 5.2. und 5.3.) bestand aus einem unten zugespitzten Holzpfahl mit einem in etwa 70 cm Abstand von der Spitze befestigten, waagrechten Arm. Diesen Pfahl steckten wir unmittelbar neben dem zu prüfenden Halm in den Boden und horizontierten ihn mit einer Wasserwaage. Um störende Einflüsse des oberen Halmteils (Luftwiderstand, Gewicht, Verfangen in den Nachbarhalmen) zu eliminieren, schnitten wir den Halm einige cm oberhalb des waagrechten Arms des Prüfgerätes ab. Über den Halmstumpf legten wir einen Metallring, an welchem ein Faden befestigt war. Dieser Faden führte über eine Umlenkrolle am Ende des waagrechten Arms und diente zum Aufbringen der Belastung $P$ in Form von Gewichten. Mit vier Maßstäben maßen wir die Verschiebung des Halmes am Boden und in etwa 20, 40 und 60 cm über Grund, der oberste Maßstab war dabei genau auf der Höhe der Belastung (Metallring und Faden) befestigt. Mit den Bezeichnungen der Figur 5.2. kann somit das Einspannmoment als

$$M_E = P \cdot h_3 \qquad (5.2)$$

angeschrieben werden. Der Einspannwinkel $\alpha_E$ mußte indirekt, aus der Interpolation einer kubischen Parabel

$$\delta(h) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 \qquad (5.3)$$

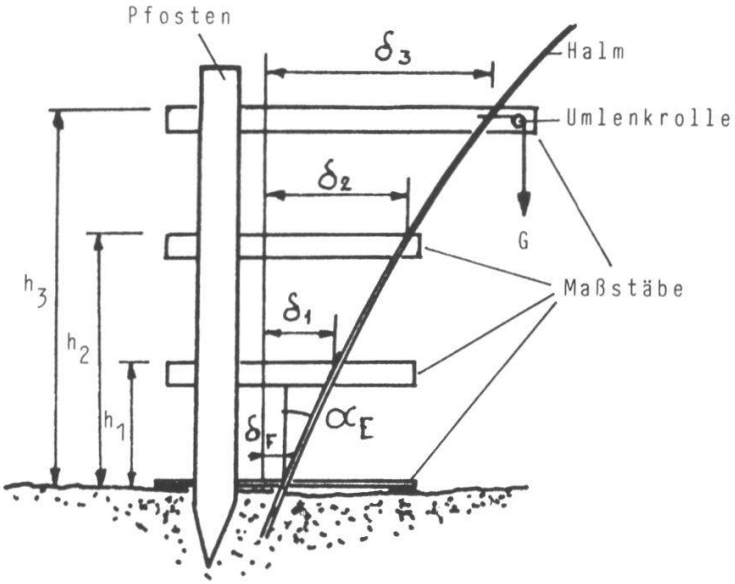


**Fig. 5.2.** Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung

**Fig. 5.3.** Messung des Einspanngrades im Feld.

durch die vier Meßpunkte berechnet werden. Da der Winkel $\alpha_E$ klein ist, kann er gleich der ersten Ableitung der Gleichung (5.3.) nach $h$ auf der Höhe $h = 0$ gesetzt werden:

$$\alpha_E \;=\; \delta'(0) \;=\; a_1 + 2a_2 h + 3\,a_3 h^2 = a_1 \qquad \text{[rad]} \qquad (5.4)$$

Dabei ist zu beachten, daß die kubische Parabel eine wellenförmige Kurve ist, es besteht also die Gefahr, daß man einen "falschen" Ausschnitt daraus durch die vier Punkte interpoliert; auch der Wendepunkt (der einem Biegemoment-Nullpunkt entsprechen würde) darf nicht innerhalb des Halmbereichs liegen. Damit diese Fehler nicht auftreten, müssen die Koeffizienten $a_{1...3}$ folgende Bedingungen erfüllen:

$$a_1 > 0 \; und \; a_2 > 0 \; und \; a_3 > 0 \qquad (5.5)$$

*oder*

$$a_1 > 0 \; und \; a_2 > 0 \; und \; a_3 < 0 \; und \; -a_2/3a_1 > h_3 \qquad (5.6)$$

Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, so ist das Resultat unbrauchbar und die

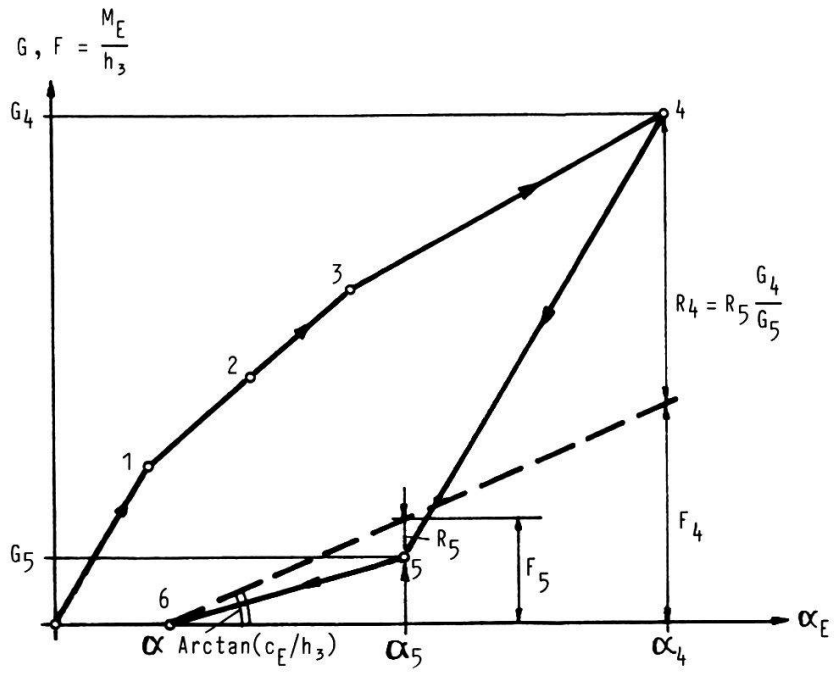


**Fig. 5.4.** Fußdrehwinkel $\alpha$ eines Schilfhalmes bei zunehmendener (Punkte 1...4) und anschließend wieder abnehmender (Punkte 4...6) Belastung.

| | | | |
|---|---|---|---|
| $G_i$: | Aufgebrachte Gewichte | $F_i$: | Auf den Halm wirkende Kraft |
| $R_i$: | Reibung | $\alpha_i$: | Fußdrehwinkel des Halmes |

Berechnung des Fußdrehwinkels muß mit einer andern Kurve versucht werden, z.B. mit einer durch eine Regressionsrechnung bestimmte, die Meßpunkte möglichst gut annähernde, quadratische Parabel.
Zeichnet man die Fußdrehwinkel $\alpha_E$ in Funktion der aufgebrachten Gewichte, so ergibt sich im Normalfall ein Bild wie in Fig. 5.4.. Die Hysterese der Kurve führt zu einer weiteren Fehlerquelle, nämlich die trotz der Umlenkrolle nicht ganz zu vermeidende Reibung. Die effektiv auf den Halm wirkende Kraft $F$ ist somit:

$$F = G - R \qquad \text{(Belastung)} \tag{5.7}$$

und

$$F = G + R \qquad \text{(Entlastung)} \tag{5.8}$$

$F$ ... Effektiv wirkende Kraft
$G$ ... Aufgebrachtes Gewicht
$R$ ... Reibungskraft

Zur Auswertung wurde die Entlastungslinie der ($G$, $\alpha_E$)-Kurve benutzt. Dazu rechneten wir mit einer angenommenen "effektiven" Entlastungslinie (vgl. Fig. 5.4.). Diese "effektive" Entlastungslinie erhielten wir unter der Annahme, daß die Reibungskraft direkt proportional zum wirkenden Gewicht sei. Aus der Figur 5.4. sowie aus den Gleichungen (1.2) und (1.1) geht unmittelbar hervor, daß der gesuchte Einspanngrad $c_E$ gleich der mit $h_3$ vervielfachten Steigung der so erhaltenen Geraden ist. Damit erhielten wir folgende Berechnungsformel für $c_E$:

$$c_E = \frac{2\,G_4\,G_5\,h_3}{(\alpha_4 - \alpha)G_5 + (\alpha_5 - \alpha)G_4} \qquad \text{[N·cm/rad]} \tag{5.9}$$

$G_4$, $G_5$ ... Wirkende Gewichte [N] (nach Fig. 5.4.)
$\alpha_4$, $\alpha_5$ ... Zugehörige Verdrehungswinkel des Halmfußes [rad]
$\alpha$ ... Verdrehungswinkel des Halmfußes nach Entlastung [rad]
$h_3$ ... Höhe über Grund des Angriffspunktes der Belastung [m]

## 5.3. ERGEBNISSE

Auf die beschriebene Weise konnte der Einspanngrad $c_E$ von 21 der geprüften Halme bestimmt werden, 20 ergaben ein brauchbares Resultat. Die Größen (Tab. 5.1.) bewegen sich in einem Bereich zwischen rund 950 N·cm/rad und 8369 N·cm/rad, der Mittelwert liegt bei 3090 N·cm/rad.
Aus diesem großen Streuungsbereich (ungefähr ein Faktor 9 zwischen Minimum und Maximum) folgt, daß der Einspanngrad keine Konstante ist. Da die Elastizität der Einspannung vor allem durch die Verformbarkeit des unmittelbar unter der Bodenoberfläche liegenden Halm- und Rhizomstücks bestimmt wird, kann eine starke Abhängigkeit des Einspanngrades von der Biegesteifigkeit des untersten Halmabschnittes vermutet werden. Die Biegesteifigkeit dieser Halmstücke (Tab. 5.1.) war im Labor (EMPA) als Mittelwert über den gut 60 cm langen Halmabschnitt gemessen worden. Die Belastung wurde, wie bei den Versuchen zur Messung des Einspanngrades im Felde, am oberen Ende als Einzellast aufgebracht, so daß die Verteilung des Biegemomentes mit den Feldversuchen übereinstimmte.
Die graphische Darstellung des Einspanngrades in Abhängigkeit dieser gemessenen Biegesteifigkeit zeigt Fig. 5.5.. Daraus kann auf einen nahezu linea-

**Tab. 5.1.** Durchmesser, mittlere Biegesteifigkeit und Einspanngrad der untersuchten Schilfhalme.

| Nr. | $d$ [cm] | $E{\cdot}J$ [N·cm$^2$] | $c_E$ [N·cm/rad] |
|---|---|---|---|
| 2 | 1,36 | 78291 | 5107 |
| 4 | 1,17 | 42578 | 1994 |
| 5 | 0,98 | 30634 | 2044 |
| 7 | 1,07 | 37606 | 2358 |
| 8 | 1,21 | 44000 | 2394 |
| 9 | 1,23 | 50697 | 3766 |
| 10 | 0,98 | 23211 | 1420 |
| 12 | 1,16 | 41734 | 2778 |
| 13 | 1,19 | 42352 | 2304 |
| 14 | 1,38 | 61346 | 5608 |
| 15 | 0,99 | 22740 | 1431 |
| 16 | 0,99 | 23221 | 697 |

| Nr. | $d$ [cm] | $E{\cdot}J$ [N·cm$^2$] | $c_E$ [N·cm/rad] |
|---|---|---|---|
| 51 | 1,10 | 35468 | 2010 |
| 53 | 1,02 | 18798 | 936 |
| 54 | 1,17 | 28751 | 2371 |
| 55 | 0,90 | 13542 | 1302 |
| 58 | 1,04 | 20720 | 785 |
| 59 | 1,31 | 43352 | 1663 |
| 60 | 1,16 | 31742 | 2809 |
| 61 | 1,02 | 16288 | 1017 |
| 62 | 1,11 | 11277 | 1187 |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

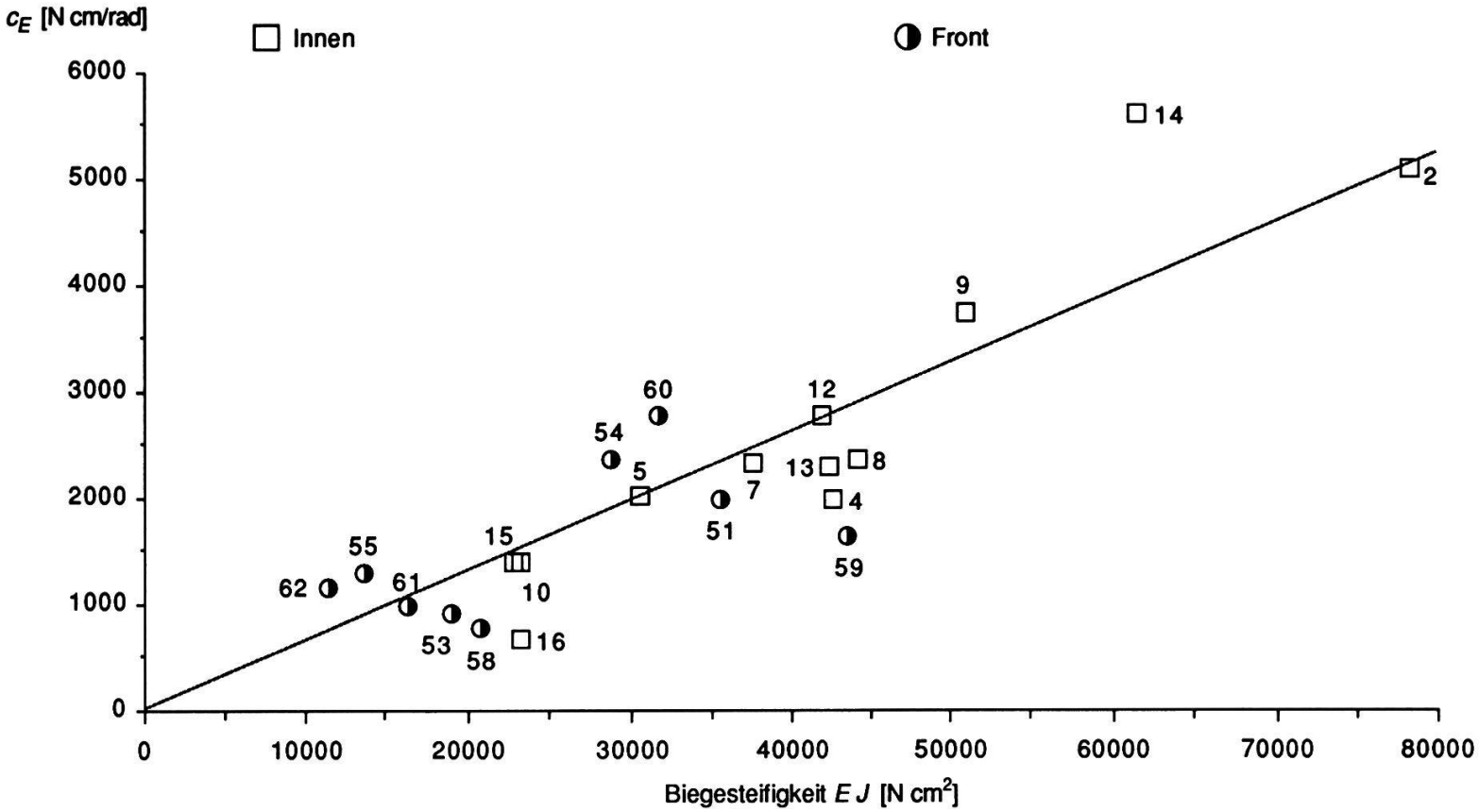


**Fig. 5.5.** Einsspanngrad $c_E$ in Funktion der Biegesteifigkeit des ungefähr 60 cm langen, untersten Halmstücks. Die eingezeichnete Linie entspricht der Regressionsgleichung (5.10); die Gerade nach (5.11) liegt so nahe bei dieser, daß sie nicht auch noch gezeichnet werden konnte. Die Nummern 1 - 6 sind Proben aus dem Bestandesinnern, die Numern 51 - 62 wurden der seeseitigen Front entnommen.

ren Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen geschlossen werden. Für den dargestellten Bereich erhielten wir aus den 20 Werten folgende Regressionsgleichung für $c_E$ in [N·cm/rad]:

$$c_E = 37{,}9\ [\mathrm{N{\cdot}cm/rad}] + 0{,}06447\ [\mathrm{cm^{-1}}]\ E{\cdot}J\ [\mathrm{N{\cdot}cm^2}] \qquad (5.10)$$

$E{\cdot}J$ ... Biegesteifigkeit des ca. 60 cm langen untersten Halmstücks [N·cm²]

Der Korrelationskoeffizient $r$ war gleich 0,88 ($r^2 = 0{,}77$).
Diese Regressionslinie geht fast genau durch den Nullpunkt (vgl. Fig. 5.5.), so daß die Annahme, der Einspanngrad sei direkt proportional zur Biegesteifigkeit des unteren Halmstücks, sicher berechtigt ist. Rechnet man die Regression unter Berücksichtigung dieser Annahme, so ergibt sich die folgende, modifizierte Gleichung:

$$c_E = 0{,}06542\ [\mathrm{cm^{-1}}]\ E{\cdot}J\ [\mathrm{N{\cdot}cm^2}]\ . \qquad (5.11)$$

Angesichts der oben erwähnten Fehlermöglichkeiten und Unsicherheiten bei der Messung des Einspanngrades sowie der zufällig streuenden, lokalen äußeren Bedingungen (Boden) für jeden einzelnen Halm, läßt der recht hohe Korrelationskoeffizient den Schluß zu, daß mit der Gleichung (5.11) die wesentlichen Größen zur Bestimmung des Einspanngrades richtig erfaßt werden.
Aus zeitlichen Gründen konnten keine weiteren Standorte mehr berücksichtigt werden. Es kann aber vermutet werden, daß die Gleichungen (5.11) bzw. (5.10) auch für andere Orte gelten, wenn nicht der Bodenaufbau völlig anders ist als bei den hier untersuchten Halmen (Feinsand-Schluff).
Diese Vermutung gründet auf der Tatsache, daß ein Teil der Flexibilität des Halmfußes durch das unterirdische Halmstück vom Rhizom bis zur Bodenoberfläche, zu einem weiteren Teil durch die Verbindung Halm-Rhizom und schließlich zu einem kleinen Teil auch durch das ebenfalls nicht starre Rhizom selbst bedingt ist. Die beiden erstgenannten Anteile werden durch die (lokale) Biegesteifigkeit bestimmt. Eine weitere Bestätigung erfährt diese Vermutung aus dem untersuchten Probenmaterial selbst: Die Proben stammen zwar alle aus dem selben Bestand, jedoch wurden die Halme mit den Nummern 1 bis 16 einige Meter im Bestandesinnern, die übrigen (Nr. 51 - 62) aus der seeseitigen Front entnommen. Trägt man die Biegesteifigkeit der Halmstücke in Funktion des Durchmessers $D$ auf (Fig. 5.6.), so unterscheiden sich die beiden Gruppen deutlich voneinander, die Proben aus der Front sind bedeutend weniger steif. Zur Verdeutlichung sind in der Figur 5.6. auch die Regressionslinien

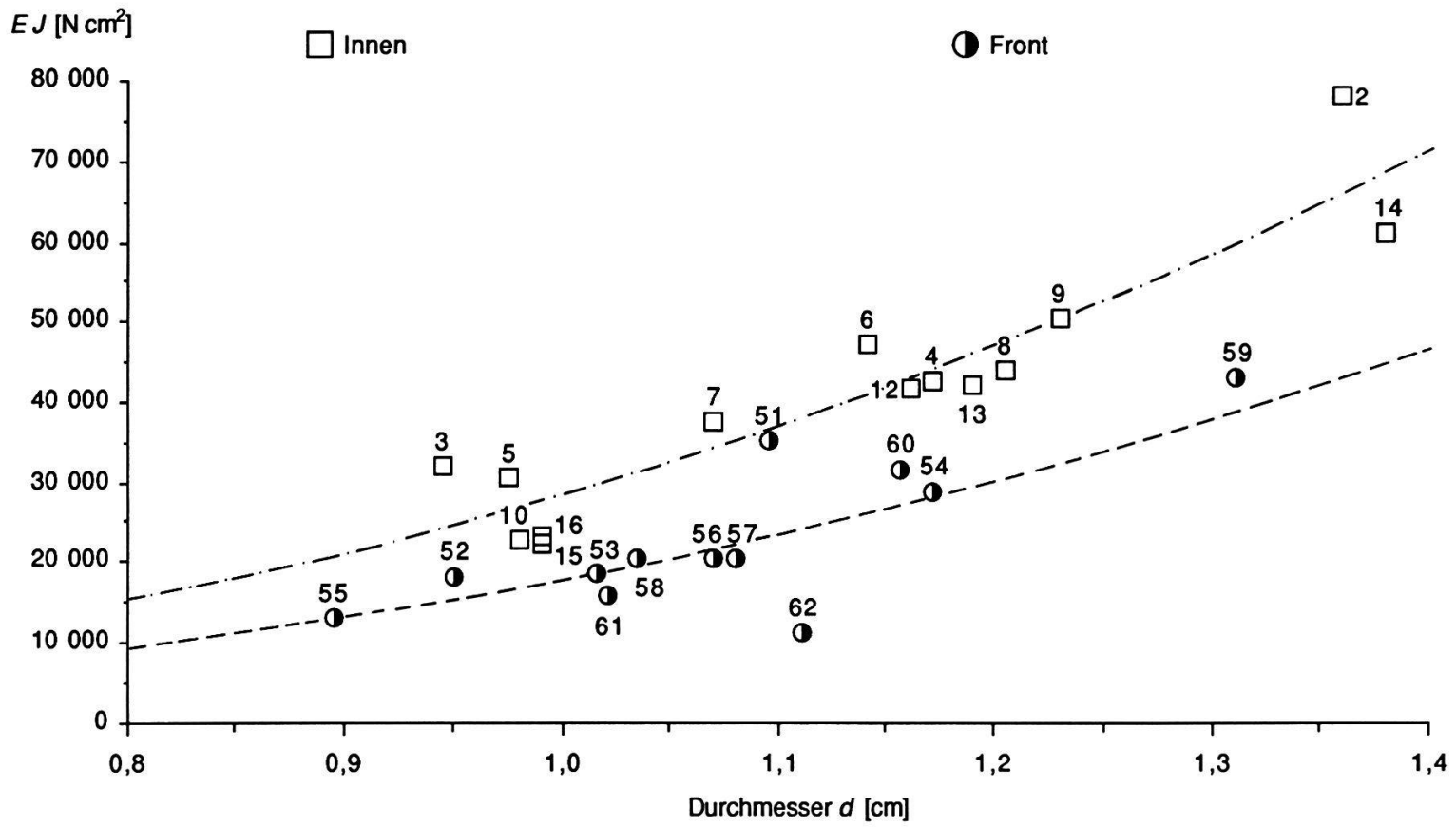


**Fig. 5.6.** Mittlere Biegesteifigkeit $E\,J$ der 60 cm langen Halmstücke in Funktion des Durchmessers. Eingezeichnet sind ferner Regressionslinien der Form $\ln y = a + b \ln x$ für:

-·-·-·- Halme aus dem Innern des Bestandes (Nr. 1 - 16) ------ Halme aus der Front (Nr. 51 - 62)

für beide Gruppen eingezeichnet, denen folgende Gleichungen zu Grunde liegen:

Nrn. 1÷16: $E{\cdot}J\,[\mathrm{Ncm}^2] = 28\,431{\cdot}D\,[\mathrm{cm}]^{2{,}716}$ $r = 0{,}92$ $n = 14$ (5.12)

Nrn. 51÷62: $E{\cdot}J\,[\mathrm{Ncm}^2] = 17\,887{\cdot}D\,[\mathrm{cm}]^{2{,}831}$ $r = 0{,}71$ $n = 12$ (5.13)

Obwohl sich also die unterschiedlichen Standortsbedingungen der beiden Entnahmeorte im Zusammenhang von Biegesteifigkeit und Durchmesser deutlich abbilden, gilt dies nicht für die Beziehung zwischen der Biegesteifigkeit und dem Einspanngrad, wie aus der Figur 5.5. zu sehen ist: Die Vermutung, daß die Gleichungen (5.11) bzw. (5.10) zumindest für die feinkörnigen Böden allgemeingültig sind, ist deshalb berechtigt.