

Anwendung der Traglasttheorie bei der Ermittlung erforderlicher Biegesteifigkeiten für die Preßkanäle von Hochdrucksammelpressen

Dr.-Ing. B. Kritzner, Fortschritt Landmaschinen GmbH Neustadt in Sachsen

1. Einleitung

Mit der Traglasttheorie läßt sich im Bauwesen die statisch ertragbare Höchstlast, z. B. einer Stahlskelettkonstruktion, berechnen. Bei Erreichen der Höchstlast ist hierbei die Stahlkonstruktion so weit plastisch verformt, daß schließlich ein kinematisches Getriebe entsteht und das Bauwerk seine Stabilität einbüßt.

Im Landmaschinenbau ist diese Methode nicht verbreitet und z. T. auch gar nicht bekannt, weil die Landmaschinen hochdynamisch belastet werden und aus diesem Grunde mehr die Probleme der Werkstoffermüdung im Vordergrund stehen. Funktionsbeschädigende Verformungen spielen eine untergeordnete Rolle.

Nachfolgend soll über ein Ausnahmeproblem berichtet werden, das an den Preßkanälen einiger Hochdrucksammelpressen auftrat und bei dem sich aufgrund der besonderen Verhältnisse die Anwendung der Traglasttheorie anbot.

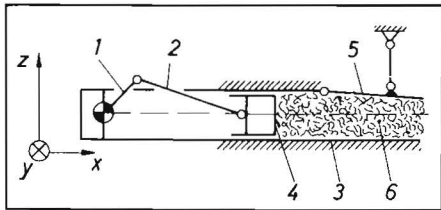


Bild 1. Prinzipdarstellung der Preßeinrichtung bei Hochdrucksammelpressen;
1 Kurbelarm, 2 Kolbenstange, 3 Preßkanal, 4 Preßkolben, 5 verstellbarer Preßbalken, 6 Erntegut

2. Problembeschreibung

Hochdrucksammelpressen dienen zum Verdichten lockerer Erntegüter, wie z. B. Stroh. Dabei wird das Erntegut in einen geraden Preßkanal eingefüllt und durch einen hin und her gehenden Kolben, der zu einem Schubkurbelgetriebe gehört, verdichtet. Die Kraft auf die Kolbenstirnfläche steht im Gleichgewicht mit den Reibungskräften des Strohranges an der Preßkanalwandung. Die Größe der Reibungskräfte kann über verstellbare Preßbalken reguliert werden (Bild 1). Die Reibungskräfte sind darüber hinaus auch von der Beschaffenheit des Erntegutes (trocken, feucht usw.) abhängig, selbst die Wachstumsbedingungen, die von Jahr zu Jahr anders sind, haben einen Einfluß. Vorhandene Überlastsicherungen versagen teilweise, weil in der äußeren Totlage der Preßeinrichtung, trotz theoretisch unendlich großer Kolbenstangenkraft, an der Kurbel kein Drehmoment wirkt.

Unter den Erntebedingungen des Jahres 1986 kam es in einigen Landwirtschaftsbetrieben zu Schadensfällen an Hochdrucksammelpressen, die bis dahin nicht bekannt waren: Es traten plastische Deformationen in dem Preßkanalbereich auf, wo das Hauptgetriebe mit dem Preßkolbenantrieb gelagert ist. In besonders schweren Fällen führte dieser Schaden zum Totalausfall der Presse unter der Wirkung des Sonderlastfalles „Verstopfung“.

Im Bild 2 sind wesentliche konstruktive Einzelheiten des Preßkanals dargestellt, sofern sie zum Verständnis der weiteren Ausführungen vonnöten sind. Bild 3 zeigt das Wesen des Schadens. Zu erkennen sind die Fließgelenke, die sich in beiden Seitenwänden örtlich begrenzt ausbilden. Die Träger haben hier einen deutlich sichtbaren Knick. Das dünne Stirnblech hält lediglich konstante Distanz zwischen den beiden Trägerenden, hat aber selbst keine beachtenswerte Biegesteifigkeit. Ausgelöst wird der Schaden durch übermäßig hohe Kolbenstangenkräfte F_k . Um derartige Schäden für die Zukunft auszuschließen, mußten konstruktive Änderungen am Preßkanal vorgenommen werden.

- Erhöhung der Trägheitsmomente in den deformierten Querschnittsbereichen
- Verwendung höherfester Werkstoffe mit höherer Fließgrenze.

Eine Änderung des statischen Systems wurde aus Funktionsgründen nicht in Erwägung gezogen.

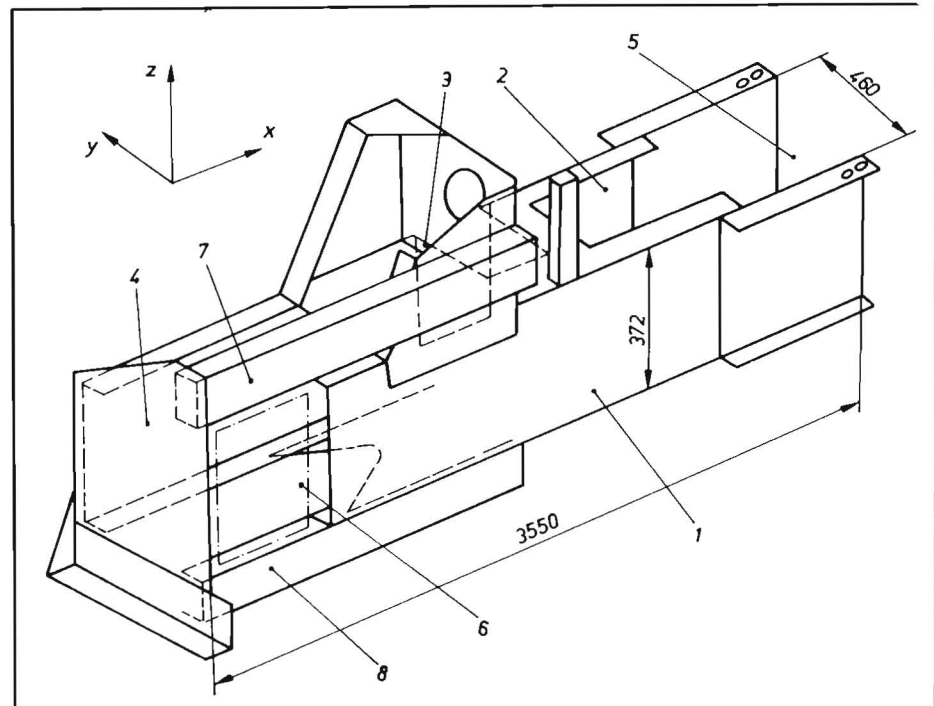
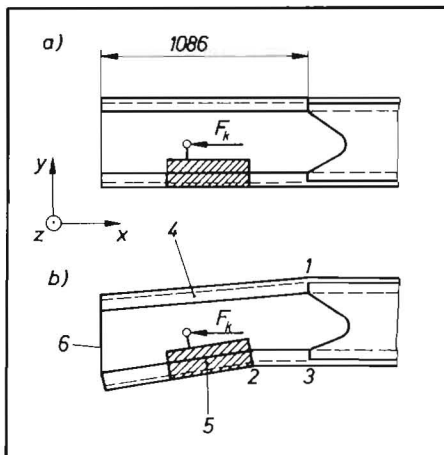
Solange noch kein wirkungsvoller Überlastschutz existiert, muß zwar weiterhin mit Schäden an bestimmten Bauteilen gerechnet werden, aber auf keinen Fall darf der Preßkanal versagen. Er ist ein sehr großes und teures Ersatzteil, das gleichzeitig auch die Funk-

Bild 2. Übersichtsdarstellung der Baugruppe Preßkanal;

1 linke Seitenwand, 2 rechte Seitenwand, 3 Einfüllöffnung für Erntegut in der rechten Seitenwand und Decke, 4 Stirnblech, 5 Erntegutaustritt, 6 Öffnung zur Aufnahme des Hauptgetriebes für den Preßkolbenantrieb, 7 oberer Kastenträger, 8 unteres C-Profil

Bild 3. Plastische Deformationen am Preßkanal im Bereich des Hauptgetriebes;

1, 2 Fließgelenke, 3 weiteres mögliches Fließgelenk, 4 Seitenwand, rechts, 5 Hauptgetriebe an der Seitenwand, links, 6 Stirnblech
 F_k Kolbenstangenkraft
a) unverformter Kanal
b) plastisch deformierter Kanal



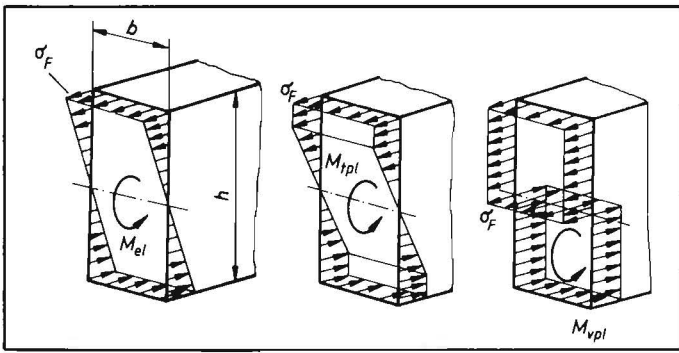


Bild 4 Spannungsverlauf in einem Rechteckquerschnitt bei Erreichen der Fließgrenze am Querschnittsrand (M_{el}), bei Teilplastifizierung (M_{vpl}) und bei vollständiger Plastifizierung (M_{vpl})

$$M_{vpl} = \frac{b h^2}{4} \sigma_F = 1,5 M_{el} \quad (2)$$

Die Gln. (1) und (2) zeigen die Querschnittsreserve des Rechteckquerschnitts auf. Sie ist bei Kompaktquerschnitten besonders groß, bei Hohlquerschnitten deutlich geringer. Bei statisch unbestimmten Systemen wird darüber hinaus noch die Systemreserve wesentlich wirksam [2].

Die Ursache für dieses Verhalten liegt im Spannungs-Dehnungs-Gesetz der üblichen Baustähle begründet (Bild 5). Unter Längskraft wird der Probestab zunächst rein elastisch gedehnt. Erreicht die Beanspruchung die Fließgrenze, ist eine Dehnungszunahme ohne Erhöhung der Kraft zu verzeichnen. Dieses Materialverhalten der Baustähle wird in der Plastizitätstheorie als „elastisch-ideal plastisch“ idealisiert dargestellt (Bild 6) und bildet somit die Grundlage für den im Bild 4 eingetragenen Spannungsverlauf im teil- und vollplastifizierten Querschnitt. Die Dehnungen des teilplastifizierten Querschnitts nehmen zwar linear mit dem Abstand von der neutralen Faser zu – das ist genauso wie bei rein elastisch verformten Querschnitten –, aber die Spannungen bleiben oberhalb der Fließdehnung konstant auf dem Wert σ_F . Das vollplastische Biegemoment wird jeweils auf die Querschnittshalbierende (keine resultierende Längskraft im Querschnitt) bezogen. Unter der Voraussetzung, daß die eine Querschnittshälfte druckplastifiziert und die andere zugplastifiziert ist, ergibt sich dann das vollplastische Biegemoment als Integral aus Spannung mal Fläche mal Hebelarm über die gesamte Querschnittsfläche.

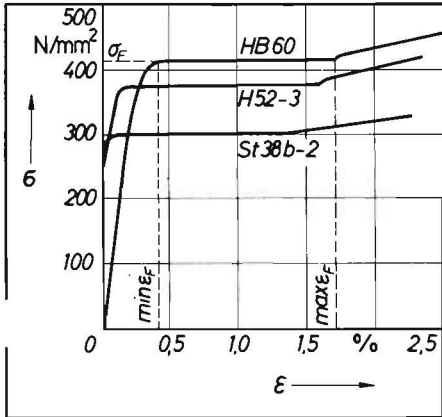


Bild 5. Unkorrigiertes Ergebnis einer Feindehnungsmessung im Fließbereich für drei verschiedene Baustähle (Meßbasis $L_0 = 20$ mm)

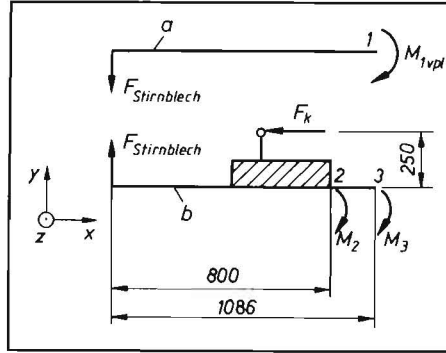


Bild 7. Statisches System des Preßkanals für den Fall „Traglastberechnung“; a Seitenwand, rechts, b Seitenwand, links, mit Hauptgetriebe

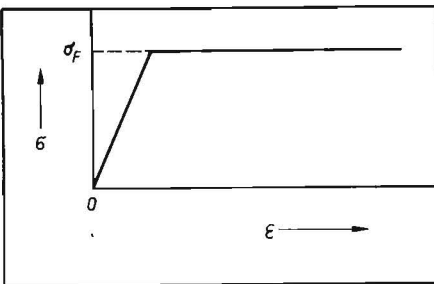


Bild 6. Elastisch-ideal plastisches Spannungs-Dehnungs-Gesetz für Baustähle

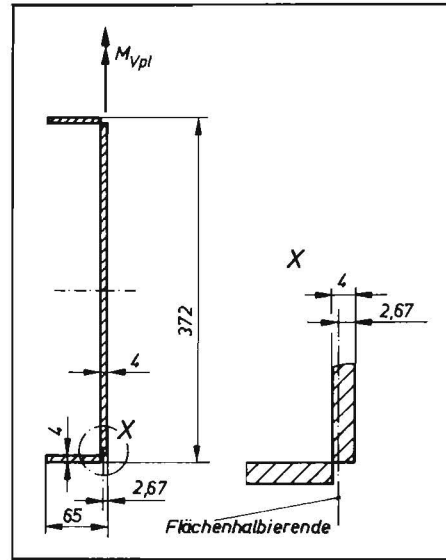


Bild 8. Querschnitt der rechten Preßkanalseitenwand

3. Das vollplastische Biegemoment in der Traglasttheorie

Bei ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen des Landmaschinenbaus wird die Tragfähigkeit als erschöpft angesehen, wenn in den Randfasern eines biegebeanspruchten Querschnitts die Fließgrenze erreicht ist. Praktisch kann die Belastung dann jedoch immer noch gesteigert werden, ohne daß Versagen durch Bruch oder übermäßige Verformung eintritt. Bild 4 stellt die Spannungsverläufe in einem Rechteckquerschnitt gegenüber, die unter der Einwirkung des maximalen elastischen aufnehmbaren Biegemoments M_{el} und des vollplastischen Biegemoments M_{vpl} vorhanden sind:

$$M_{el} = \frac{b h^2}{6} \sigma_F \quad (1)$$

4. Die Traglast des Preßkanals unter der Einwirkung der Kolbenstangenkraft F_k

Bei den Schadensfällen traten an den Punkten 1 und 2 (s. Bild 3) Fließgelenke auf. An diesen beiden Punkten mußte jeweils das vollplastische Biegemoment gewirkt haben. Bei der konstruktiven Verbesserung muß zusätzlich noch der Punkt 3 betrachtet werden, um auch dort Versagen auszuschließen. Konstruktive Veränderungen sollen ausschließlich die linke Seitenwand betreffen.

Das statische System der Untersuchung ist im Bild 7 dargestellt. Im Fließgelenk 1 ist ein Querschnitt $[372 \times 65 \times 4$ St38 ($\sigma_F = 24$ kN/cm²) vorhanden (Bild 8). Sein vollplastisches Biegemoment beträgt $M_{vpl 1} = 400$ kN cm.

Im Stirnblech muß gleichzeitig eine Kraft

$$F_{Stirnblech} = \frac{400}{108,6} = 3,68 \text{ kN}$$

wirken, die die linke Seitenwand stützt. Im Versagensfall wirken an den Punkten 2 und 3 folgende Biegemomente:

$$M_2 = F_k \cdot 25 - F_{Stirnblech} \cdot 80 = 3756 \text{ kN cm}$$

$$M_3 = F_k \cdot 25 - F_{Stirnblech} \cdot 108,6 = 3650 \text{ kN cm}$$

Die linke Seitenwand mußte nun so verstärkt werden, daß ihr vollplastisches Biegemoment an beiden Punkten über diesen angegebenen Werten liegt. Das wurde u. a. auch durch die Verwendung höherfester Werkstoffe mit höherer Fließgrenze erreicht. Entsprechend den Gln. (1) und (2) ist das aufnehmbare vollplastische Biegemoment der Fließgrenze direkt proportional. Der verstärkte Querschnitt der linken Seitenwand wird im Bild 9 der vorherigen Ausführung gegenübergestellt. Der obere und der untere

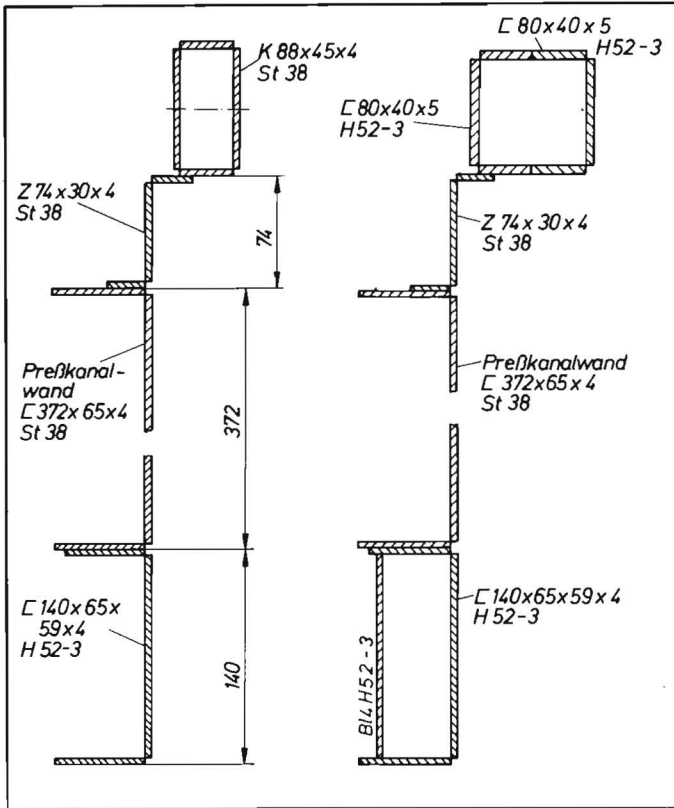


Bild 9. Konstruktive Veränderung der linken Preßkanalwand im Bereich der Fließgelenke 2 und 3 (rechts die neue Ausführung)

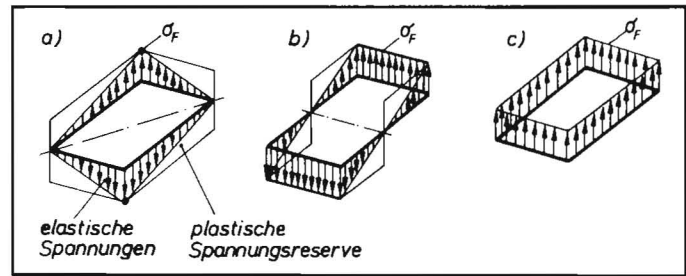


Bild 10. Spannungsverläufe;
 a) Spannungsgebirge und Spannungsreserve bei zweiachsiger Biegung eines Kastenprofils (elastische Auslastung $\alpha \approx 50\%$)
 b) Spannungsgebirge und Spannungsreserve bei einachsiger Biegung eines Kastenprofils (elastische Auslastung $\alpha \approx 75\%$)
 c) Spannungsgebirge bei reiner Längskraft-Normalbeanspruchung (elastische Auslastung $\alpha \approx 100\%$, keine Traglastreserve)

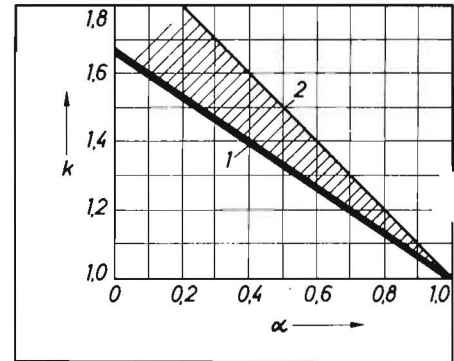


Bild 11
 Mögliche vollplastische Tragreserven gegenüber rein elastischer statischer Belastung bis zur Fließgrenze (1 offene und Hohlquerschnitte, 2 Kompaktquerschnitte)

Bereich der Seitenwand wurden jeweils für sich als tragend gerechnet, wie es auch aus dem Schadensfall heraus ersichtlich war.

5. Traglastreserve von Querschnitten bei Belastung über die maximal mögliche rein elastische Beanspruchung hinaus

In den Gl. (1) und (2) wurden Werte für den Rechteck-Vollquerschnitt bei einachsiger Biegung angegeben. Die Traglastreserve eines Querschnitts hängt allerdings von der Querschnittsform und der Art der einwirkenden Belastung ab. Einzelheiten dazu sind im Bild 10 am Beispiel eines Kastenprofils dargestellt.

Bei zweiachsiger Biegung ist die Traglastreserve verhältnismäßig groß, weil die rein elastische Beanspruchung bis zum örtlichen Erreichen der Fließgrenze nur zwei Querschnittspunkte erfaßt. Große Teile des Querschnitts können darüber hinaus noch weiter beansprucht werden. Gegenüber vollständiger Plastifizierung erreichen die rein elastischen Spannungen nur eine etwa 50%ige Auslastung. Bei reiner Normalkraftbeanspruchung ist überhaupt keine Traglastreserve vorhanden, weil mit einem Schlage im gesamten Querschnitt die Fließgrenze erreicht wird.

Bei der Abschätzung der Plastifizierungsreserven ist zu bedenken, daß der Schwerpunkt der noch plastifizierungsfähigen Spannungskörper stets näher an der neutralen Faser liegt, als derjenige der bereits elastisch ausgeschöpften Spannungskörper. Das ist auch der Grund dafür, daß die elastische Auslastung nicht direkt als Maßstab der Traglastreserve genommen werden kann.

Als Anhaltswert kann man die Traglastreserve k bei bekannter elastischer Auslastung α nach Bild 11 bestimmen:

$$\alpha = \frac{\text{maximal mögliches elastisches Spannungsvolumen}}{\text{mögliches vollplastisches Spannungsvolumen}} \quad (3)$$

$$k = \frac{\text{plastisch aufnehmbare Biegemomente}}{\text{elastisch aufnehmbare Biegemomente}} \quad (4)$$

Die untere, stark ausgezogene Kurve liegt i. allg. auf der sicheren Seite. Die schraffierte Fläche beinhaltet den möglichen Streubereich. Die obere Kurve ist mehr für Kompaktquerschnitte zutreffend, die untere für gegliederte offene und Hohlquerschnitte.

Ist das elastische Spannungsvolumen annähernd bekannt und das dazugehörige vollplastische ebenfalls, kann man anhand von Bild 11 ermitteln, mit welchem Faktor die elastischen Biegemomente zu multiplizieren sind, um die vollplastischen zu erhalten. Erst mit Erreichen der Vollplastifizierung werden die Verformungen so groß, daß sie mit bloßem Auge sichtbar sind und der Totalausfall der Konstruktion kurz bevorsteht. Beim elastisch ausgeschöpften Rechteckquerschnitt nach Bild 4 ist $\alpha = 0,5$. Die obere Begrenzungskurve des schraffierten Bereichs ergibt hierbei $k = 1,5$. Das ist genau das Ergebnis der Gl. (2). Ein Kastenprofil (Hohlquerschnitt) hat demgegenüber bei einachsiger Biegung eine Auslastung von $\alpha = 0,75$ (Bild 10b). Die untere Kurve von Bild 11 ergibt hierfür $k = 1,17$, also wesentlich weniger als für den Vollquerschnitt.

6. Zusammenfassung

Die Anwendung der Traglasttheorie empfiehlt sich nicht bei Konstruktionen, die ausschließlich gegen Ermüdung zu dimensionieren sind. Im vorliegenden Beispiel trat jedoch der Fall unzulässig hoher Deformationen in den Vordergrund. Hier ist die Traglasttheorie durchaus geeignet, um zielstrebig konstruktive Verbesserungen vornehmen zu können. Dabei ist gleichzeitig der Einsatz höherfester Stähle (H 52-3, HS 60, H 75) sehr wirkungsvoll, um mit verhältnismäßig geringem Materialaufwand große Effekte zu erzielen.

Die Traglasttheorie führt bei statisch un' stimmten Systemen auf verhältnismäßig einfache Gleichungen unter Umgehung der Arbeitsgleichung, weil lediglich der Versagenszustand untersucht wird. An den Fließgelenken des kinematischen Getriebes, in das sich die Konstruktion umbildet, wirken jeweils die vollplastischen Biegemomente.

Die dargestellte Dimensionierungsmethodik hat sich bewährt. Es sind keine neuen Schadensfälle bekannt geworden.

Literatur

- [1] G. Niemann: Maschinenelemente, Band I. Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1981, S. 56-58.
- [2] F. Ziegler: Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper. Leipzig: Fachbuchverlag 1985, S. 419-424.