

Berechnungsmethode für das Umsturzverhalten eines Ackerschleppers am Hang

Von Helmut Schwanghart, München *)

DK 614.8:631.372

Bei einem seitlichen Umsturz eines Schleppers am Hang ist außer der Festigkeit des Schutzbügels bzw. der Kabine das Nicht-Weiterrollen ein wesentlicher Sicherheitsfaktor. Es wird berechnet, bei welchen geometrischen Abmessungen des Aufbaues ein Schlepper nach einem Umsturz liegen bleibt. Dabei werden nur Drehbewegungen um die Schlepperlängsachse berücksichtigt. Somit gilt die Rechnung vornehmlich für Schlepper, bei denen der Schwerpunkt nahe an der Hinterachse und in dem von der Kabine umbauten Raum liegt. Teilelastische oder plastische Stöße an den Aufprallstellen auf den Boden werden berücksichtigt. Mit Hilfe von Durchschnittswerten für die wichtigsten Parameter verschieden schwerer Schlepper wird deren Einfluß auf das Weiterrollen aufgezeigt.

Seitliches und rückwärtiges Umstürzen von Schleppern haben in der BRD bis zum Jahre 1970 jährlich ca. 250 Todesopfer gefordert. Seit 1970 muß jeder neu zugelassene Schlepper mit einem Umsturzbugel ausgerüstet werden, um eine größere Sicherheit zu gewährleisten. Da nicht nur die Festigkeit des Bugels beim Überrollen, sondern gerade die Verhinderung des Weiterrollens eines umkippenden Schleppers durch den Bugel einen wesentlichen Sicherheitsfaktor darstellt, wurden in den Schlepper-Prüfbestimmungen der einzelnen Länder sogenannte Umsturztests vorgesehen. So muß z. B. nach den Prüfbestimmungen der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften ein aus dem Stand umkippender Schlepper am Hang mit der Steigung 1 : 2,5 liegenbleiben.

1. Aufgabenstellung

Im folgenden soll der Umsturzvorgang eines Schleppers rechnerisch untersucht werden. Ziel ist es zu ermitteln, bei welchen Bugelbreiten und Bugelhöhen der Schlepper nach einem seitlichen Umsturz nicht weiterrollt. Hierbei werden nur Drehbewegungen des Schleppers um seine Längsachse betrachtet. Die Rechnung gilt bei der hier angewandten ebenen Betrachtungsweise für Schlepper, bei denen der Schwerpunkt in den Kabinenraum oder nahezu in den Kabinenraum fällt. Bei größeren Abständen sind die errechneten Höhen und Bugelbreiten zu gering. Die Ergebnisse zeigen aber in jedem Fall, welcher von zwei zu vergleichenden Schleppern nach einem Umsturz leichter weiterrollt und welcher sicherer liegenbleibt.

Nach der Berechnung der Drehgeschwindigkeiten und Drehenergien eines Schleppers in den einzelnen Umsturzphasen wird der Einfluß des Einsinkens in den Boden, des Schleppergewichtes, der Spurweite und der Schwerpunkthöhe auf das Weiterrollverhalten aufgezeigt. Dazu werden die Parameter Spurweite, Bereifung, Schwerpunkthöhe und Trägheitsmoment in Abhängigkeit vom Schleppergewicht für die gängigsten Schlepper zusammengestellt und in die Rechnung eingeführt.

*) Dr.-Ing. Helmut Schwanghart ist Obergeringieur am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Söhne) der TU München.

2. Umsturzvorgang und Weiterrollkriterium

Für die Umsturzrechnung müssen folgende Schlepperparameter gegeben sein:

- h_s Schwerpunkthöhe
- b_R Breite des Hinterreifens
- s Spurweite
- Θ_s Massenträgheitsmoment bezogen auf die Längsachse durch den Schwerpunkt
- m Masse des Schleppers
- D Höhe des Hinterreifens
- B Bugelbreite
- H_{ges} Gesamthöhe.

In Bild 1 sind die einzelnen Lagen des Schleppers während des Überrollens dargestellt. Es wird angenommen, daß er aus dem labilen Gleichgewicht mit $\omega_{A0} = 0$ zu kippen beginnt, mit ω_{A1} im Punkt B auf den Hang aufschlägt und nach Wirkung der Impulskräfte P mit ω_{B0} weiterdreht. ω_{B1} ist die Auftreff-Drehgeschwindigkeit des Bugels und ω_{C0} die Weiterdrehgeschwindigkeit nach dem Stoß auf den Bugel C. Hat der Schlepper noch eine Drehgeschwindigkeit ω_{end} im zweiten labilen Gleichgewicht, so rollt er weiter. Ist diese oder eine der vorhergehenden Drehgeschwindigkeiten Null, bleibt der Schlepper am Hang liegen.

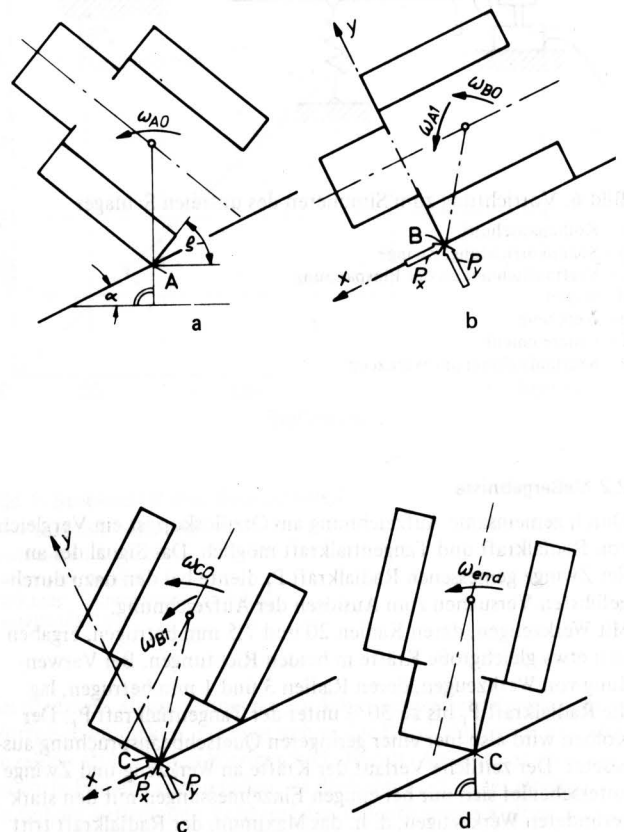


Bild 1. Umsturzphasen eines Schleppers.

3. Kippen und Drehgeschwindigkeit vor dem Aufprall auf den Hang

Der Schlepper kippt, Bild 2, bei einer Hangneigung von $\alpha = \rho$;

$$\rho = \arctan \frac{s + b_R}{2h_s} \quad (1)$$

Er dreht mit dem Radius

$$r_A = \sqrt{\left(\frac{s + b_R}{2}\right)^2 + h_s^2} \quad (2)$$

und hat kurz vor dem Aufprall des Hinterrades auf den Boden eine Drehgeschwindigkeit von:

$$\omega_{A1} = \sqrt{\frac{2mgh_1}{\Theta_A}} = \sqrt{\frac{2mgr_A [1 - \cos(90 - \rho + \alpha)]}{\Theta_s + mr_A^2}} \quad (3)$$

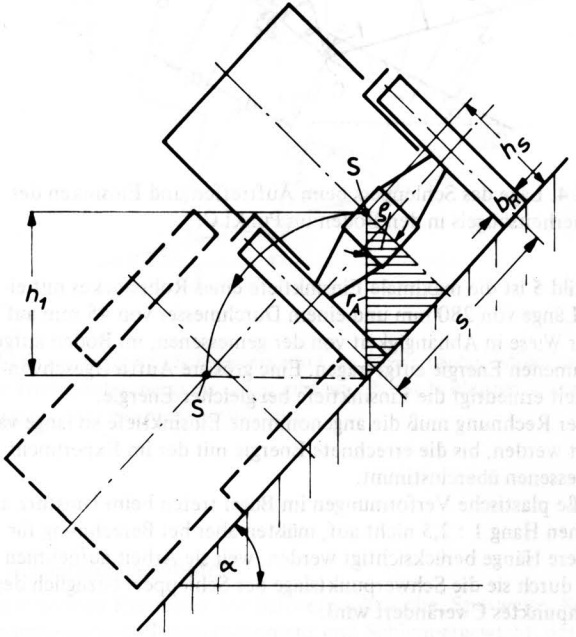


Bild 2. Statischer Kippwinkel eines Schleppers mit zwei starren Achsen.

4. Aufprall des Schleppers auf das Hinterrad

Wenn der Schlepper mit einer Drehgeschwindigkeit ω_0 auf den Boden aufschlägt, wird er an der Aufprallstelle t cm tief in den Boden einsinken, Bild 3. Dabei können Stöße in Hangrichtung (in x-Richtung) und senkrecht dazu (in y-Richtung) auftreten. Diese Stöße lassen sich unter bestimmten Annahmen berechnen und mit ihnen kann dann die Weiterrollgeschwindigkeit ermittelt werden. Es muß erfüllt sein: das Kräftegleichgewicht in x- und y-Richtung, Gleichung (a) bzw. (b) sowie das Momentengleichgewicht (c) im Schwerpunkt. In dieser Rechnung werden nur Stoßkräfte berücksichtigt, Auflager- und Gewichtskräfte sind hier vernachlässigt. Das Moment um den Schwerpunkt liefert der Drallsatz, wobei sich das Moment aus den Kräften und den Hebelarmen bzw. nach der Integration aus den Impulsen und den Hebelarmen ergibt. Die Impulse lassen sich bestimmen, wenn die Schwerpunktschwindigkeiten durch die entsprechenden Drehgeschwindigkeiten ersetzt werden. Setzt man die Impulse in den Drallsatz ein, so läßt sich die Weiterroll-Drehgeschwindigkeit ω nach einem plastischen oder elastischen Stoß mit der Stoßzahl k errechnen, Gleichung (h).

$$m \ddot{x} = P_x(t); m \dot{x} = \int P_x(t) dt; m(\dot{x}_s - \dot{x}_{s0}) = \int P_x(t) dt = -J_x \quad (a)$$

$$m \ddot{y} = P_y(t); m \dot{y} = \int P_y(t) dt; m(\dot{y}_s - \dot{y}_{s0}) = \int P_y(t) dt = J_y \quad (b)$$

$$\Theta_s \ddot{\phi} = M(t); \Theta_s \dot{\phi} = \int M(t) dt; \Theta_s(\omega - \omega_0) = J_x c - J_y d \quad (c)$$

$$\text{Geschw.: } \dot{x}_{s0} = \omega_0 b + \dot{x}_0 \quad (d)$$

$$\dot{y}_{s0} = -\omega_0 a \quad (e)$$

$$\dot{x}_s = \omega \cdot c \quad (f)$$

$$\dot{y}_s = \omega \cdot d + (a + d) \cdot \omega_0 k \quad (g)$$

Werden (d) bis (g) eingesetzt in (a) und (b), so ergibt sich mit $\dot{x}_0 \approx 0$:

$$J_x = -m\omega c + m\omega_0 b,$$

$$J_y = m\omega d + m(a + d)\omega_0 k + ma\omega_0.$$

Und dies eingesetzt in (c) führt zu:

$$\Theta_s \omega - \Theta_s \omega_0 = -mc^2 \omega + mbc\omega_0 -$$

$$m\omega d^2 - mad\omega_0 k - md^2\omega_0 k - mad\omega_0$$

$$\text{und: } \omega = \frac{\Theta_s + mbc - md^2k - (k + 1)mad}{\Theta_s + mc^2 + md^2} \cdot \omega_0 \quad (h).$$

Durch zahlreiche Filmaufnahmen von Schlepperumsturzversuchen und aufgrund der Bodeneindrücke an den Aufprallstellen ergibt sich, daß der Schlepper beim 1. Aufprall mit dem Hinterrad und beim 2. Aufprall mit dem Bügel jeweils um die Aufprallpunkte weiterdreht und nicht vom Boden abhebt, was auf einen nahezu plastischen oder nur gering elastischen Stoß hinweist. Für die Rechnung wird daher die Stoßzahl $k = 0$ gesetzt.

Bezeichnet man die Drehgeschwindigkeit des Schleppers vor dem Stoß mit ω_{A1} und die Weiterdrehgeschwindigkeit nach dem Aufprall des Rades mit ω_{B0} , Bild 1, und wird das Einsinken des Hinterrades wegen der großen Auflagefläche gleich Null gesetzt, so ergibt sich die Drehgeschwindigkeit ω_{B0} nach dem Stoß mit folgenden Abmessungen:

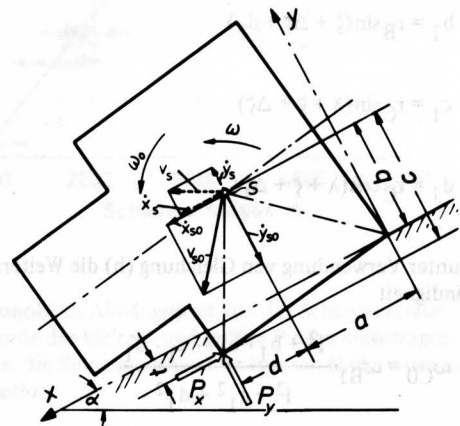


Bild 3. Auf den Schlepper wirkende Kräfte beim Aufprall des Hinterrades.

$$h_3 = r_C [\sin(\lambda + \zeta + \Delta\zeta + \alpha) - 1] \quad (22)$$

$$\omega_{\text{end}} = \sqrt{\frac{2gh_3}{i^2 + r_C^2} + \omega_{C0}^2} \quad (23)$$

Ist hierbei ω_{end} größer Null, wird der Schlepper weiterrollen, reicht die kinetische Energie nach dem Stoß in C nicht aus, um den Schwerpunkt in die labile Lage zu befördern, bleibt der Schlepper liegen. Zu klären ist auch, ob der Schlepperschwerpunkt nach Einsinken des Punktes C nicht schon über die labile Lage hinaus gewandert ist und somit der Schlepper in jedem Fall weiterrollt.

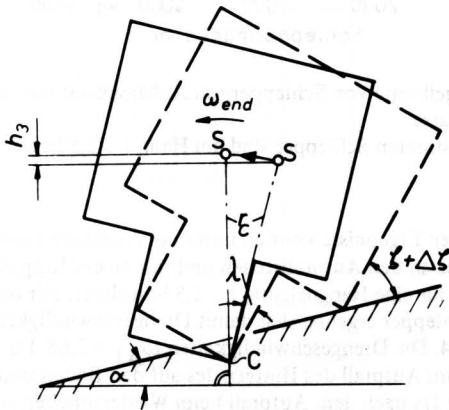


Bild 6. Drehung des Schleppers um C in die kritische, labile Lage. Die Drehgeschwindigkeit ω_{end} gibt an, ob der Schlepper schnell, langsam oder gar nicht weiterrollt.

7. Schlepperparameter

Die einzelnen Parameter wie Schwerpunktshöhe, Spurweite, Reifenabmessungen, Trägheitsmoment und Schleppergewicht, deren Einfluß auf das Weiterrollverhalten berechnet werden soll, sind selbst voneinander abhängig.

In den Bildern 7 bis 11 sind diese Werte von allen gängigen Schleppern zusammengestellt und jeweils in Abhängigkeit von der Schleppermasse aufgetragen. Daraus ergeben sich folgende mittlere Abhängigkeiten der Parameter von der Schleppermasse, wenn diese in kg eingesetzt wird:

Schwerpunktshöhe: $h_s = 560 + 0,08 \cdot m$ [mm] (24)

Spurweite: $s = 1050 + 0,15 \cdot m$ [mm] (25)

Reifenbreite: $b_R = 80 + 0,11 \cdot m$ [mm] (26)

$b_R = 455$ [mm]; für $m > 3400$ kg (26a)

Reifenhöhe: $D = 784,6 + 0,2354 \cdot m$ [mm] (27)

$D = 1585$ [mm]; für $m > 3400$ kg (27a)

Massenträgheitsmoment: $\Theta_s = 0,4625 \cdot m - 675$ [kg m²]; für $m > 1800$ kg (28)

$\Theta_s = 0,0875 \cdot m$ [kg m²]; für $m < 1800$ kg (28a)

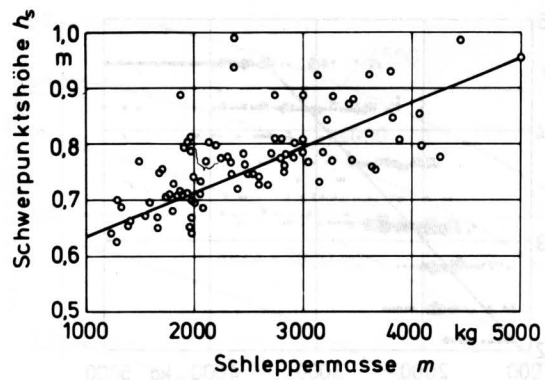


Bild 7. Schwerpunktshöhe von OECD-geprüften Schleppern in Abhängigkeit von der Schleppermasse.

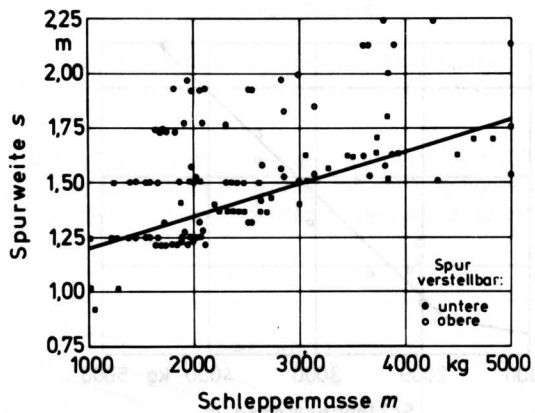


Bild 8. Spurweite von OECD-geprüften Schleppern in Abhängigkeit von der Schleppermasse.

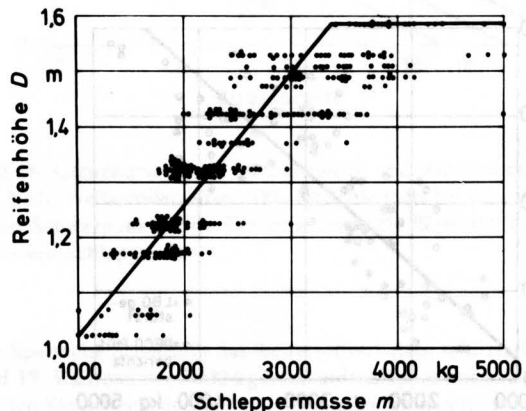


Bild 9. Reifenhöhe in Abhängigkeit von der Schleppermasse. Für jeden Typ wurde der kleinste und größte Reifen eingetragen. Die Reifenhöhe ist die Summe aus dem wirksamen Halbmesser und dem Reifenradius.

Die Gesamthöhen und Bügelbreiten von Schleppern sind in den Bildern 12 und 13 in Abhängigkeit von der Schleppermasse aufgetragen. Die vollen Kreise geben Maße von Schleppern wieder, die am grasbewachsenen Hang mit der Steigung 1 : 2,5 aus dem Stand umgestürzt wurden und dabei nicht weitergerollt sind.

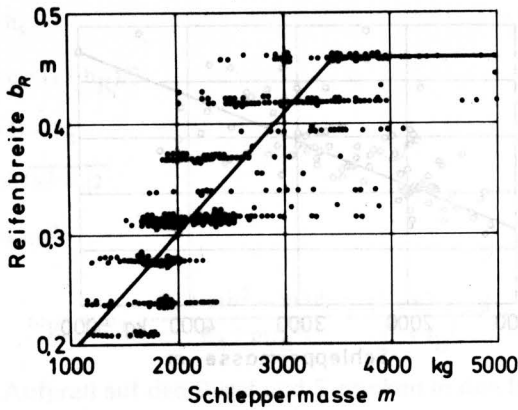


Bild 10. Reifenbreite in Abhängigkeit von der Schleppermasse.

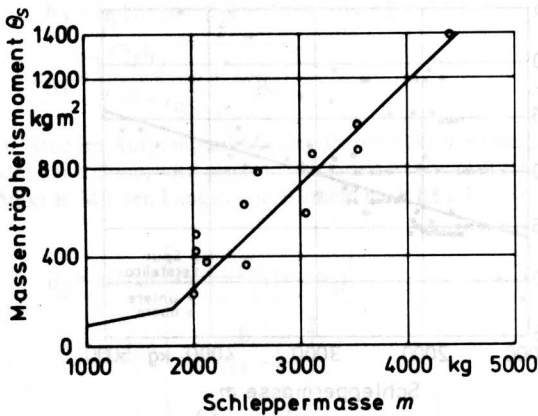


Bild 11. Gemessene Massenträgheitsmomente bezogen auf die Längsachse durch den Schwerpunkt in Abhängigkeit von der Schleppermasse.

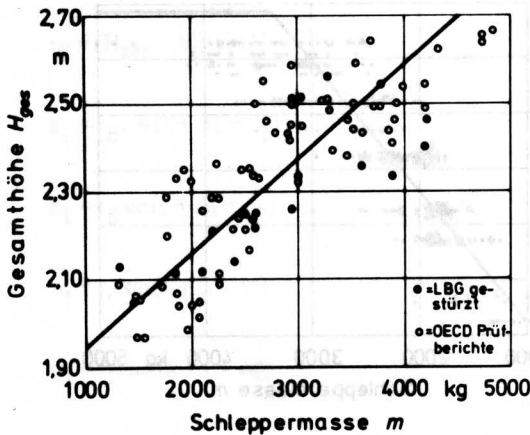


Bild 12. Gesamthöhen von OECD-geprüften Schleppern in Abhängigkeit von der Schleppermasse.

8. Ergebnisse

Nach den Bildern 7 bis 11 ergeben sich für einen durchschnittlichen 3000 kg-Schlepper folgende Parameter: Schwerpunktshöhe 0,8 m; Spurweite 1,5 m; Reifenhöhe 1,491 m; Reifenbreite 0,41 m; Massenträgheitsmoment bezogen auf die Längsachse durch den Schwerpunkt 712,5 kg m²; Gesamthöhe 2,38 m und Gesamtbreite 1,30 m.

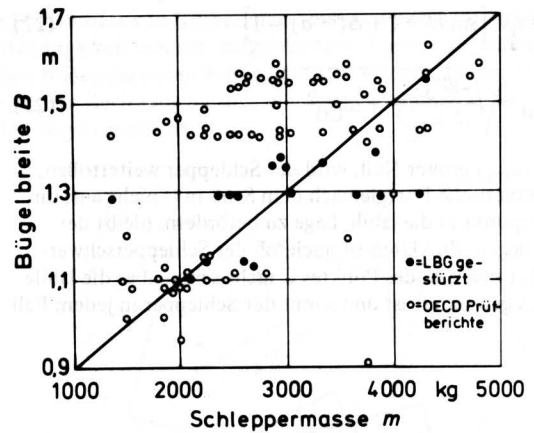


Bild 13. Bügelbreite von Schleppern in Abhängigkeit von der Schleppermasse.

Die LBG-gestürzten Schlepper sind am Hang 1 : 2,5 liegen geblieben.

Die folgenden Ergebnisse wurden unter der Annahme eines plastischen Stoßes an den Aufprallstellen und mit einem Kippwinkel nach Bild 2 für eine Hangneigung 1 : 2,5 berechnet. Für obigen 3000 kg-Schlepper ergeben sich damit Drehgeschwindigkeiten nach Bild 14. Die Drehgeschwindigkeiten $\omega_{A1} = 2,68$ 1/s in der Lage A1 beim Aufprall des Hinterrades auf den Boden und $\omega_{B0} = 0,99$ 1/s nach dem Aufprall beim Wiederabheben sind vom Sicherheitsbügel unabhängig.

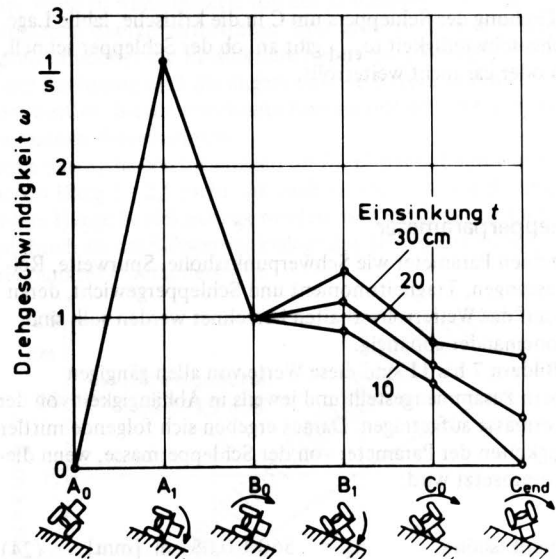


Bild 14. Drehgeschwindigkeit eines mittleren 3000 kg-Schleppers in den verschiedenen Umsturzphasen bei unterschiedlicher Einsinkung des Bügels in den Boden.

Je nachdem wie tief der Bügel beim Aufschlag auf den Boden einsinkt, erhöht oder senkt sich der Schwerpunkt bis zur Lage B1, so daß die Drehgeschwindigkeit in B1 kleiner oder größer wird. Durch den Stoß auf den Bügel dreht der Schlepper in jedem Fall mit einer niedrigeren Geschwindigkeit ω_{C0} weiter. Die Drehgeschwindigkeit in der labilen Lage C_end, bei der der Schwerpunkt vertikal über der Bügelecke liegt, läßt erkennen, ob der Schlepper schnell ($t = 30$ cm), langsam ($t = 20$ cm) oder gar nicht weiterrollt ($t = 10$ cm).

Für jeden Schlepper gibt es eine bestimmte Höhe und Bügelbreite, bei der er nach dem Umsturz am Hang 1 : 2,5 liegenbleibt. Nach Bild 15 muß ein Schlepper mit einem schmalen Bügel höher sein, damit er nicht weiterrollt.

Die notwendigen Höhen und Breiten kann man in der Weiterrollgrenzkurve darstellen. Soll ein Schlepper nach einem Umsturz am Hang 1 : 2,5 nicht weiterrollen, so müssen Höhe und Breite außerhalb der Grenzkurve liegen.

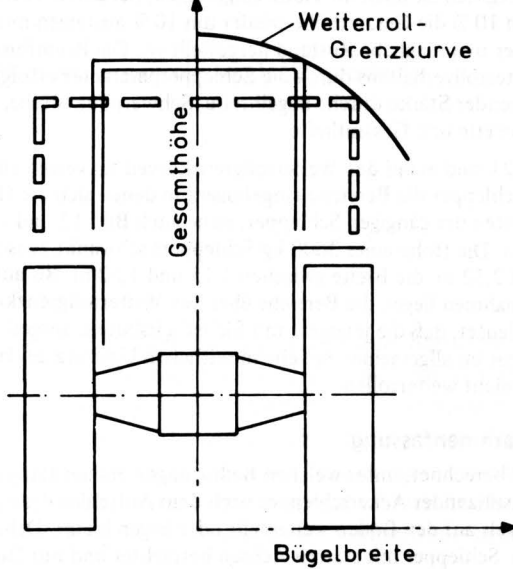


Bild 15. Schema für die Weiterroll-Grenzkurve.

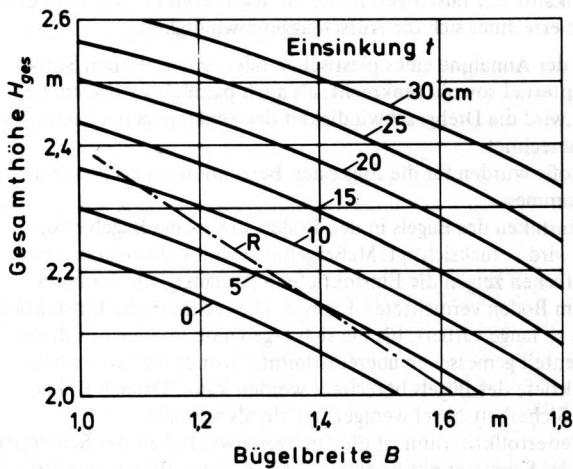


Bild 16. Grenzkurven bzw. Mindesthöhen und Mindestbreiten für ein Nicht-Weiterrollen eines 3000 kg-Schleppers bei verschiedener Einsinktiefe des Bügels in den Boden. Die Kurve R gibt die nach Bild 5 errechnete tatsächliche Einsinktiefe an.

Für den 3000 kg-Schlepper sind diese Weiterroll-Grenzkurven bei verschiedenen Einsinktieftiefen des Bügels in Bild 16 dargestellt. Berücksichtigt man die Beziehung zwischen Einsinktiefe und vom Boden (Wiese) aufgenommene Energie nach Bild 5, so ergibt dies bei einem schmalen Bügel von 1,10 m eine tatsächliche Einsinktiefe von 10 cm und bei einem 1,40 m breiten Bügel eine Einsinktiefe von nur 5 cm. Große Einsinktieftiefen, wie sie auf sehr weichen Böden vorkommen, erfordern höhere und breitere Sicherheitsbügel. Der Berechnung der folgenden Kurven liegt eine angenommene Gesamtverformung des Bodens und Bügels von 10 cm zugrunde.

Mit den Abhängigkeiten der Parameter nach Gleichung (24) bis (28) sind die Weiterrollgrenzkurven für Schleppermassen von 2000 bis 4500 kg berechnet und in Bild 17 aufgetragen. Eine Vergrößerung der Breite um 20 cm bringt im Durchschnitt denselben Erfolg wie eine Vergrößerung der Höhe um 5 - 10 cm. Ein 3000 kg-Schlepper, der durchschnittlich einen 1,3 m breiten Bügel hat, muß demnach mindestens 2,27 m hoch sein, damit er nicht weiterrollt.

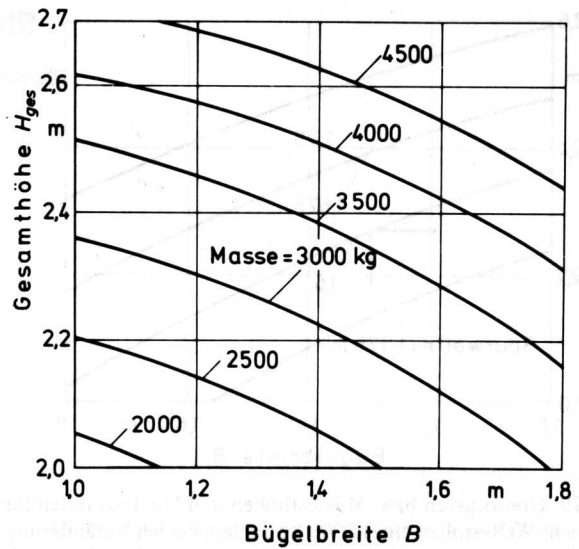


Bild 17. Grenzkurven bzw. Mindesthöhen und Mindestbreiten für ein Nicht-Weiterrollen von Schleppern unterschiedlicher Masse.

In Bild 18 zeigt die stark ausgezogene Kurve mit $h_s = 0,8$ m die Grenzkurve des 3000 kg-Schleppers. Ein um 5 cm höherer Schwerpunkt bedingt einen um 5 cm höheren oder um ca. 12 cm breiteren Sicherheitsbügel.

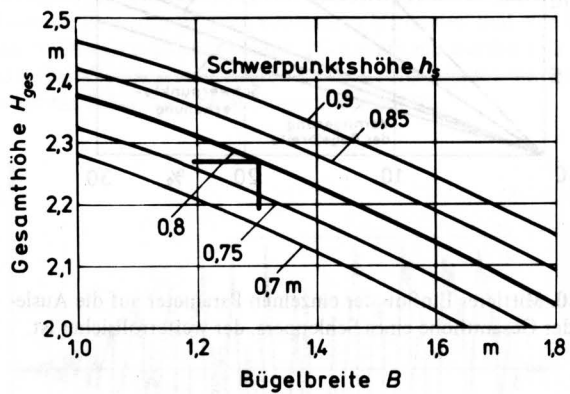


Bild 18. Grenzkurven bzw. Mindesthöhen und Mindestbreiten für ein Nicht-Weiterrollen eines 3000 kg-Schleppers bei unterschiedlicher Schwerpunkthöhe. Der eingezeichnete Bügel stellt den Standard-Schlepper dar.

Die Spurweite beeinflusst das Weiterrollverhalten sehr stark, Bild 19. Während der 3000 kg-Standardschlepper mit einem 1,3 m breiten Sicherheitsbügel bei einer normalen Spurweite von 1,5 m (eingezeichnete Bügel) 2,27 m hoch sein muß, genügt bei der Spurweite von 1,375 m eine Höhe von 2,13 m. Mit einer Spurweite von 1,25 m bleibt er unabhängig von den Bügelmaßen schon nach dem ersten Aufprall mit dem Hinterrad am Hang 1 : 2,5 liegen. Verbreitert man die Spurweite um 25 cm, muß man den Sicherheitsbügel um 25 cm erhöhen, wenn die gleiche Sicherheit gegen Weiterrollen gewährleistet sein soll. Je schmaler die Spurweite ist, desto eher bleibt der Schlepper beim seitlichen Umsturz am Hang liegen.

Welcher Parameter den größten Einfluß auf das Weiterrollverhalten hat, ist in Bild 20 dargestellt. Hier ist als Beispiel die notwendige Vergrößerung der Gesamthöhe in % in Abhängigkeit von der Änderung anderer Schlepperparameter in % aufgetragen. Soll bei einem Schlepper, der nicht weiterrollt, diese Fähigkeit erhalten bleiben, so muß bei einer Verkleinerung der Bügelbreite um 10 %

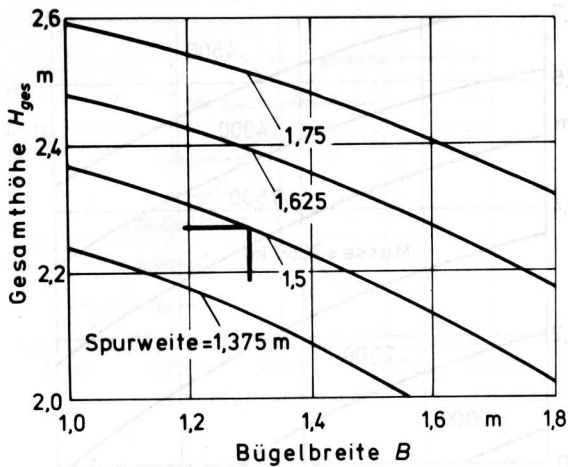


Bild 19. Grenzkurven bzw. Mindesthöhen und Mindestbreiten für ein Nicht-Weiterrollen eines 3000 kg-Schleppers bei Veränderung der Spurweite. Der eingezeichnete Bügel stellt den Standard-Schlepper dar.

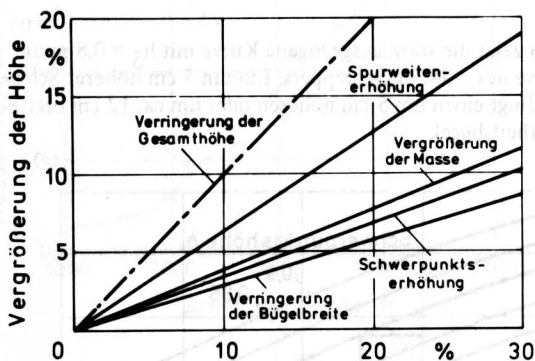


Bild 20. Mittlerer Einfluß der einzelnen Parameter auf die Auslegung der Gesamthöhe eines Schleppers, der weiterrollsicher ist.

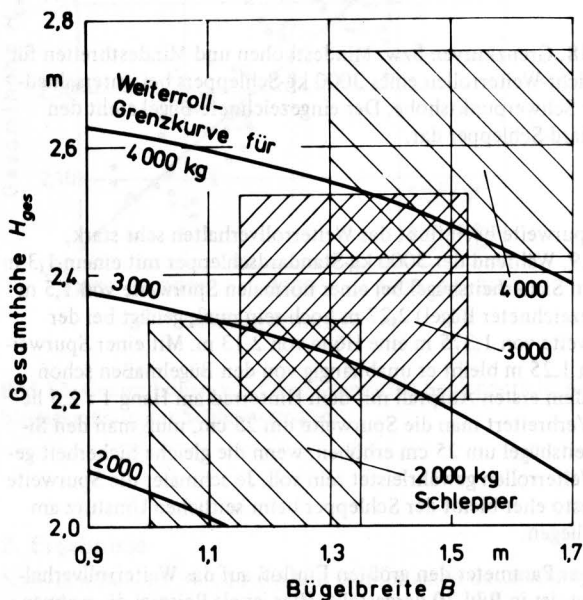


Bild 21. Nach der Rechnung notwendige Gesamthöhen und Bügelbreiten für weiterrollsichere Schlepper unterschiedlicher Masse (Grenzkurven) und Bereiche der Parameter von zur Zeit gängigen Schleppern.

die Höhe um ca. 3 % vergrößert werden. Bei einer 10 %igen Schwerpunkterhöhung muß die Gesamthöhe um 3,5 %, bei einer 10 %igen Massenerhöhung um 4 % und bei einer 10 %igen Spurweitenverbreiterung um 6,5 % vergrößert werden. Zum Vergleich ist noch die Höhe eingetragen, bei deren Verringerung um 10 % die Gesamthöhe wieder um 10 % ansteigen muß, damit der ursprüngliche Zustand hergestellt ist. Die Beeinflussung des Weiterrollverhaltens durch die Schlepperparameter erfolgt in zunehmender Stärke durch: Bügelbreite, Schwerpunkthöhe, Masse, Spurweite und Gesamthöhe.

In Bild 21 sind außer den Weiterrollgrenzkurven für verschieden große Schlepper die Bereiche eingetragen, in denen sich die Höhen und Breiten der gängigen Schlepper, siehe auch Bild 12 und 13, bewegen. Die Höhe eines 3000 kg-Schleppers schwankt zwischen 2,2 und 2,52 m; die Breite zwischen 1,15 und 1,52 m. Bis auf kleine Ausnahmen liegen die Bereiche über den Weiterrollgrenzkurven. Das bedeutet, daß die jetzigen, mit Sicherheitsbügeln ausgerüsteten Schlepper im allgemeinen bei einem seitlichen Umsturz am Hang 1 : 2,5 nicht weiterrollen.

9. Zusammenfassung

Es wird berechnet, unter welchen Bedingungen ein am Hang seitlich umstürzender Ackerschlepper nach dem Aufschlag des Sicherheitsbügels auf den Boden weiterrollt oder liegen bleibt. Dabei werden Schlepper mit starren Achsen betrachtet und nur Drehbewegungen um die Längsachse (ebenes Problem) angenommen.

Der Schlepper beginnt zu kippen, wenn der Schwerpunkt über der Außenkante der talseitigen Räder zu liegen kommt. Aus dem Energiesatz errechnet sich die Aufschlaggeschwindigkeit.

Unter der Annahme eines plastischen oder teilelastischen Stoßes am Hinterrad sowohl senkrecht, als auch parallel zur Bodenoberfläche, wird die Drehgeschwindigkeit des Schleppers nach dem Aufprall berechnet.

Die Stöße wurden für die folgenden Berechnungen als plastische angenommen.

Das Einsinken des Bügels in den Boden sowie eine Bügelverformung wird berücksichtigt. Meßergebnisse von Fallversuchen mit Rohrstücken zeigen die Einsinktiefe in Abhängigkeit der beim Stoß im Boden vernichteten Energie. Die rechnerische Einsinktiefe wurde so lange variiert, bis die sich ergebende Energie mit der experimentell gemessenen übereinstimmte, womit die tatsächliche Einsinktiefe des Bügels berechnet werden kann. Danach sinken breite Sicherheitsbügel weniger tief ein als schmale.

Das Weiterrollkriterium ist die Drehgeschwindigkeit des Schleppers wenn der Schwerpunkt vertikal über der in den Boden eingedrun-genen Bügelkronen liegt.

Für die Berechnung des Umsturzverhaltens wurden von derzeitigen Schleppern die zur Rechnung notwendigen Parameter in Abhängigkeit von der Schleppermasse aufgetragen. Schwerpunkthöhe, Gesamthöhe und untere Spurweiten steigen proportional zur Schleppergröße an, ebenso Reifenhöhe und Reifenbreite. Letztere bleiben allerdings über 3400 kg nahezu konstant. Nach welchem Gesetz die Trägheitsmomente bei schwereren Schleppern ansteigen, läßt sich auf Grund der wenigen Meßpunkte noch nicht eindeutig bestimmen.

Für jeden Schlepper gibt es eine bestimmte Bügelhöhe und Bügelbreite, die ein Weiterrollen am Hang 1 : 2,5 verhindert. Diese Abmessungen sind in Abhängigkeit von den einzelnen Schlepperparametern berechnet. Demnach benötigen schwerere Schlepper höhere und breitere Sicherheitsbügel. Eine Vergrößerung der Bügelbreite um 20 cm bewirkt durchschnittlich dasselbe, wie eine Vergrößerung der Höhe um 5 - 10 cm. Ein um 5 cm höherer Schwerpunkt bedingt einen um 5 cm höheren Sicherheitsbügel. Je geringer die Spurweite ist, desto leichter kippt ein Schlepper zwar um, desto sicherer bleibt er allerdings nach einem Umsturz liegen. Verbreitert man die Spurweite um 25 cm, so muß bei gleicher Weiterroll-sicherheit der Bügel um 25 cm erhöht werden.

Die Rechnung ergibt, daß die heutigen, mit Sicherheitsbügeln ausgerüsteten Schlepper nach einem Umsturz am Hang 1 : 2,5 im Durchschnitt nicht weiterrollen.