

## Eine Erklärung über unstationäres Schneiden im Boden und ein praktisches Beispiel für Modelgreifer

Von

Shōjirō HATA\*

(Eingegangen am 27. Januar 1960)

Zur Berechnung von Schnittwiderständen bei Bodenschneiden braucht man die Zerstörungsfestigkeit des Bodens zu finden. Als den Index, der auf diese Festigkeit weist, wählte der Verfasser die Schnittfestigkeit aus, die an Ort und Stelle leicht geprüft werden kann und mit dem Schnittwiderstand in geradem Verhältnis steht.

Für das unstationäre Schneiden, wobei die Schnitttiefe in einem Schnittlauf mit der Zeit verändert ist, untersuchte der Verfasser mit einer neu erfundenen Einrichtung den Eindringungsvorgang von Schneidmesser in den Boden. Infolge vieler Experimente hat es sich gefunden, daß Eindrucksziffer, der die Eindringungsfähigkeit des Schneidmessers zeigt — je kleiner er ist, desto leichter ist das Schneidmesser einzudringen — und mit der Schnittfestigkeit gerades Verhältnis hat, für Spanwinkel des Schneidmessers von  $20^{\circ}$ – $30^{\circ}$  den Minimalwert hat und mit zunehmendem Krümmungshalbmesser der Schneidenkante außerordentlich zunimmt. Die Gleichung ist auch eingeleitet worden, damit man unter gegebenen Bedingungen den Ort der Schneidenkante berechnen kann.

Mit dieser Beziehung ist Grabenvorgang eines Modelgreifers untersucht worden, und gegriffenes Bodengewicht im Greifer und Seilzüge in Greiferseilen sind ins klare gebracht worden.

### Einleitung

Nach dem Zweiten Weltkrieg hat in unserem Land die Mechanisierung des Erdbaues große Fortschritte gemacht, und Leistungsfähigkeiten inländischer Baumaschinen erreichen beinahe den weltlichen Durchschnitt. Denkt man sich doch an die Baumaschine, so findet man, daß ihre Maschinenelemente zwar durch Entwicklung des Maschinenwesens und der Metallkunde merkwürdig verbessert worden sind, aber sich Planen ihrer Schneidenwerkzeuge nur auf Erfahrungen, nicht Theorien, gestützt hat. Das liegt auf dem Grund, daß Eigenschaft des zu bearbeitenden Bodens sehr kompliziert ist und es viele unbekannte Gebiete der Bodenmechanik gibt.

---

\* Institut für Bauingenieurwesen

Trotz dieser Schwierigkeiten wurden seit langem ziemlich viele Untersuchungen angestellt, besonders führte Rathje<sup>1)</sup> nähere Forschungen über den Schnittvorgang im Sande aus und hat sehr wertvolle Ergebnisse gegeben, über ein stationäres Schneiden, wobei sich die Schnitttiefe mit der Zeit nicht verändert.

Beobachtet man ausführlich praktische Arbeitszustände der Grabenmaschinen, findet man, daß der Schnittvorgang nicht immer derjenige beim stationären Schneiden ist: Beim Arbeiten von Grabenmaschinen mit Eimern; Greifer, Schaufelbagger, Schrapper und Schurfkübelbagger, ist die Schneidenkante nicht in konstanter Schnitttiefe gehalten, sondern in jedem Augenblick bewegt. Diesen Schnittzustand nannte der Verfasser 'das unstationäre Schneiden'.

Da der Schnittvorgang in diesem Fall von demjenigen beim stationären Schneiden verschieden ist, muß man den Widerstand gegen Eindringung des Schneidwerkzeuges in den Boden finden, dessen Wert sich von der Rückkraft beim stationären Schneiden fern.

#### Schnittfestigkeit des Bodens

Damit man den Schnittwiderstand eines Bodens berechne, muß man die Zerstörungsfestigkeit des Bodens suchen. Als gewöhnlich benutzte Indexe, die auf die Bodenfestigkeit weisen, gibt es die Kohäsion und den Winkel der inneren Reibung des Bodens. Mit ihnen ist es aber sehr schwierig den Schnittwiderstand des Bodens zu berechnen, weil eine allgemeine Beziehung zwischen ihnen und Schnittwiderstand noch nicht festgestellt ist, und weil sich der Zerstörungsvorgang beim Prüfen dieser Indexe von demjenigen beim Schneiden des Bodens unterscheidet. Um diese Nachteile zu beseitigen, hat Prof. Dr. S. Murayama und der Verfasser eine neue Prüfungsmethode erfunden, die in ähnlichen Zustand, wie beim Schneiden, und an Ort und Stelle leicht geprüft werden kann. Diese Methode ist im folgenden.

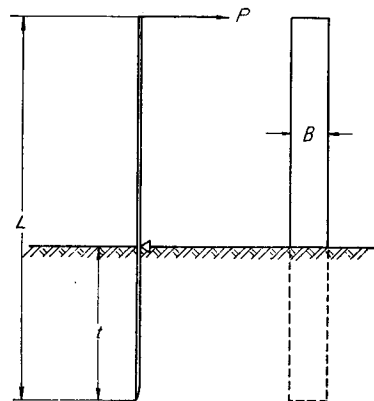


Bild 1. Prüfungsmethode der Schnittfestigkeit.

Die steife, schlanke Stahlplatte, so wie es Bild 1 andeutet, wird senkrecht in einen zu prüfenden Boden eingeschoben, indem sie nicht den Boden störe. Dann wird sie an ihrem Oberende umzugraben gezogen, indem sie um den auf der Bodenfläche befestigten Stützpunkt umfällt. In diesem Augenblick mißt man die größte Zugkraft  $P$ . Der Verfasser nannte den in folgender Gleichung ausgedrückten

Wert  $e_s$ , die Schnittfestigkeit des Bodens:

$$e_s = P(L-t)/Bt^3 \quad [\text{kg/cm}^3] \quad \dots\dots(1)$$

wobei  $L$  die Länge und  $B$  die Breite der Prüfplatte und  $t$  die Tiefe der Einschiebung in den Boden bedeutet.

Infolge vieler Experimente mit verschiedenen Böden war die Eigenschaft von  $e_s$ , dessen Wert sich je nach dem Zustand jedes Bodens verändert, in drei Gruppen geteilt. Wenn trockene Sande gleichmäßig gefüllt waren, waren die

Werte von  $e_s$  unabhängig von der Einschiebungstiefe der Prüfplatte (**Bild 2a**). Wenn bindige Böden durch Walzen verdichtet waren, waren in der Nähe der Bodenfläche die Werte von  $e_s$  groß und nahmen mit den zunehmenden Einschiebungstiefen ab (**Bild 2b**). Wenn sich die Bodenraumgewichte mit den Tiefen vermehrten, nahmen die Werte von  $e_s$  gegensätzlich mit den Tiefen zu (**Bild 2c**). So weist der Wert von  $e_s$  in beliebiger Einschiebungstiefe auf die von oben bis dieser Tiefe durchschnittliche Schnittfestigkeit. Da diese Methode eine Art Vergleichprüfung

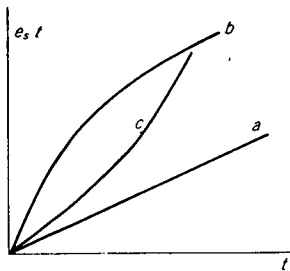


Bild 2. Eigenschaften der Schnittfestigkeiten.

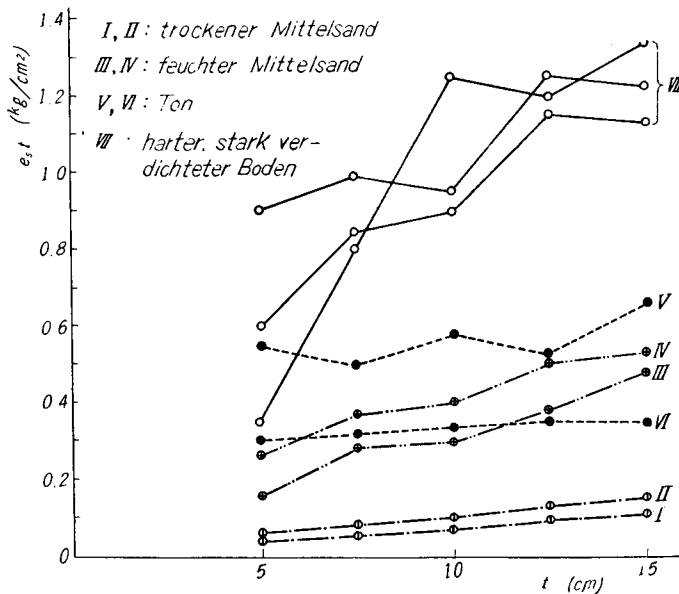


Bild 3. Werte von Schnittfestigkeiten der verschiedenen Böden.

ist, und ihr Vorgang auch noch nicht theoretisch erklärt ist, so muß man eine konstante Breite der Prüfplatte benutzen, um den Wert von  $e_s$  als den Index, der

mit den Schnittwiderstand eine gewisse Beziehung hat, auf die Berechnung der Schnittkraft anzuwenden. Deshalb verwendete immer der Verfasser die Prüfplatte von 5 cm breit. **Bild 3** zeigt Ergebnisse dieser Prüfung von einigen Böden.

### Versuche über Stationäres Schneiden

Über das stationäre Schneiden des Bodens, wobei sich die Schnitttiefe während eines Schnittlaufs konstant hält, hat der Verfasser früher einige Versuchsergebnisse veröffentlicht<sup>2)</sup>. Hier gibt er einen Umriß dieser Untersuchung.

#### Versuchseinrichtung

In **Bild 4** bedeutet *A* den Versuchswagen, der auf an beiden Seiten der Versuchsbahn gelegten Schienen fährt,

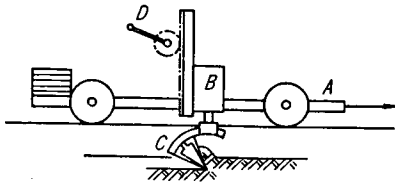


Bild 4. Versuchseinrichtung von stationärem Schneiden.

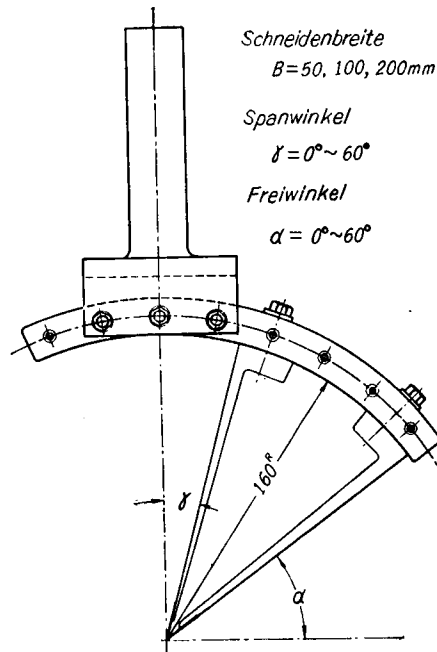


Bild 5. Form des verwendeten Schneidmessers.

und auf ihm die Meßgeräte *B* für Horizontal- und Vertikal-Komponente des Schnittwiderstandes vorgerichtet sind. Als Meßelemente dienten Dehnungsmeßstreifen und die Meßströme wurden durch eine Sechs-Schleifen-Oszillographen aufgezeichnet. *C* ist das Schneidmesser, wie es **Bild 5** bedeutet, dessen Span- und Freiwinkel einzeln stufenlos verändert sind. Das wird mit den Meßgeräten mittels Umdrehung der Handhabe *D* auf- und absteigern und an beliebiger Stelle festgesetzt. Als Versuchsböden wurden die in **Bild 3** gezeigte Mittelsande I. II und III ausgewählt, deren Kornverteilungskurven in **Bild 6** dargestellt sind. Die Versuchsbahn war 4 m lang und 1 m breit; die Schichtdicke des eingebrachten Bodens betrug 60 cm. Vor jedem Versuch riß man den Boden mit einer Bodenfräse auf, strich ihn ab, stellte einen Feuchtigkeitsgehalt fest und verdichtete ihn durch eine Anzahl von Walzübergängen, dann prüfte man die Schnittfestigkeit des Bodens,

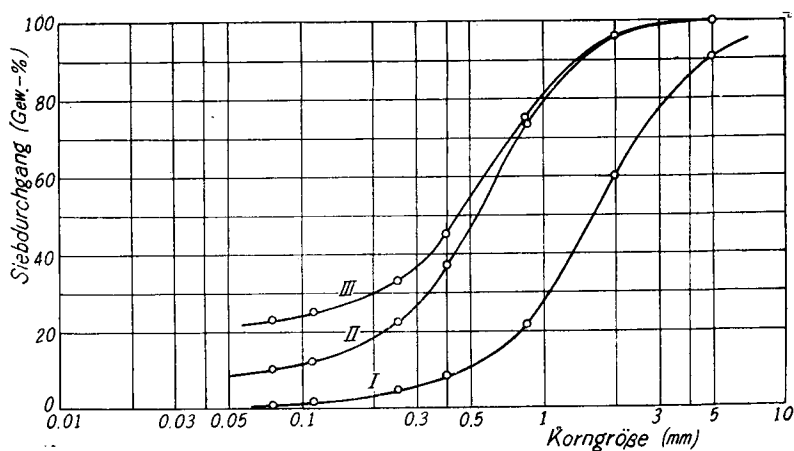


Bild 6. Kornverteilungskurven der Versuchsböden.

### Versuchsergebnisse

(1) Aus vielen Experimenten ergibt sich die Beziehung für sandige Böden ;

$$\left. \begin{aligned} H_{\gamma} &= k e_s B^l t^m 10^{-n\gamma} \\ V_{\gamma} &= H_{\gamma} \operatorname{tg}(\delta - \gamma) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$H_{\gamma}$  : Horizontal-Komponente des Schnittwiderstandes im Anfang des Schneidens beim Spanwinkel von  $\gamma$  [kg]

$V_{\gamma}$  : Vertikal-Komponente des oberen [kg]

$e_s$  : Schnittfestigkeit des Bodens [kg/cm<sup>3</sup>]

$B$  : Breite des Schneidmessers [cm]

$t$  : Schnitttiefe [cm]

$\gamma$  : Spanwinkel des Schneidmessers [Radian]

$\delta$  : Reibungswinkel zwischen Boden und Schneidmesser [Radian]

$k, l, m$  und  $n$  : Experimentelle Koeffizienten, in diesen Versuchen waren sie im folgenden :

$$k = 1,82, \quad l \doteq 1, \quad m \doteq 2, \quad n = 0,45.$$

In Gl. (2) braucht man doch den Wert von  $e_s$ , der in derselben Tiefe beim Schneiden gemessen worden ist, zu verwenden.

(2) Einwirkung der Schnittgeschwindigkeit auf den Schnittwiderstand konnte im Bereich der Geschwindigkeiten von 0,2 bis 20 cm/s kaum bemerkt werden.

### Versuche über Unstationäres Schneiden

In Wirklichkeit findet sich das unstationäre Schneiden, wobei die Schnitttiefe in jedem Augenblick verändert ist. Für diese Erscheinung ist die vorstehende

Beziehung ungenügend, um sie ausführlich zu behandeln. Um diese zu erklären, untersuchte der Verfasser mit der neu erfundenen Einrichtung, die frei auf- und absteigendes Schneidmesser hat.

### Versuchseinrichtung

Bild 7 zeigt eine schematische Zeichnung der bei diesen Versuchen verwendeten Einrichtung: Ist der lange Hebel *A*, der an seinem Ende das bei vorigen Versuchen verwendete Schneidmesser *B* festhält, durch den auf dem Versuchswagen festgesetzten Punkt *C* gestützt, so geht das Schneidmesser um den Stützpunkt frei. Wenn der Hebelarm lang genug ist, so kann man das Schneidmesser senkrecht bewegend ansehen. Damit das aus der Horizontal-Komponente des Sch-

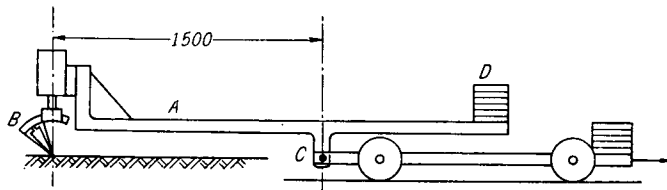


Bild 7. Versuchseinrichtung von unstationärem Schneiden.

nittwiderstandes entstehende Drehmoment um den Stützpunkt nicht das Freigehen des Schneidmessers einschränke, braucht man die Schneidenkante und den Stützpunkt möglichst in derselben Ebene zu setzen. Die Eindruckkraft des Schneidmessers wurde durch Mäßigung des auf den Hebel gegenseitig vorgerichteten Gegengewichts *D* beliebig gegeben. Bei diesen Versuchen verwendeten Böden waren dieselbe bei den vorderen Versuchen.

### Versuchsergebnisse

(1) Infolge vieler Experimente ergibt sich die Beziehung für sandige Böden:

$$NB - V_{\gamma} = Bbt \frac{dt}{dx} \quad \dots\dots(3)$$

darin bedeuten: *B* die Breite des Schneidmessers, *N* die Eindruckkraft pro Längeneinheit des Schneidmessers,  $V_{\gamma}$  die Vertikal-Komponente des Schnittwiderstandes, *t* die Schnitttiefe und *x* die Schnittstrecke; *b* ein experimenteller Koeffizient, den der Verfasser 'Eindruckziffer' nennt, zeigt die Eindringungsfähigkeit des Schneidmessers—je kleiner *b* ist, desto leichter ist das Schneidmesser einzudringen— die sich nach Formen des Schneidmessers, d. h. Span- und Freiwinkel und Schärfe der Schneidenkante, und nach der Schnittfestigkeit des Bodens verändert.

(2) Aus vielen Experimenten mit sandigen Böden ist der Eindrucksziffer  $b$  ins klare gebracht worden :

i) Span- und Freiwinkel und Eindrucksziffer : Wenn der Spanwinkel  $20^\circ \sim 30^\circ$  betrug, hat der Eindrucksziffer  $b$  den Minimalwert (Bild 8). Für den Freiwinkel war der Wert von  $30^\circ$  und mehr wünschenswert.

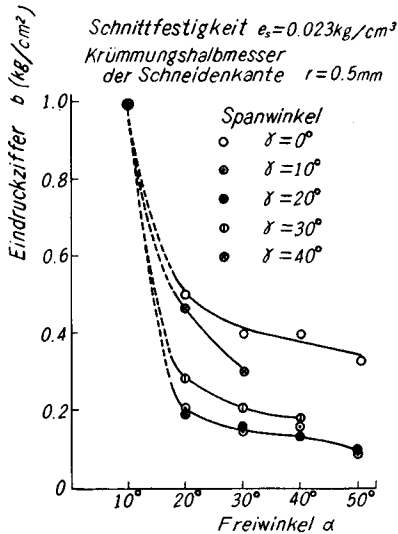


Bild 8. Beziehung zwischen Span- und Freiwinkel und Eindrucksziffer.

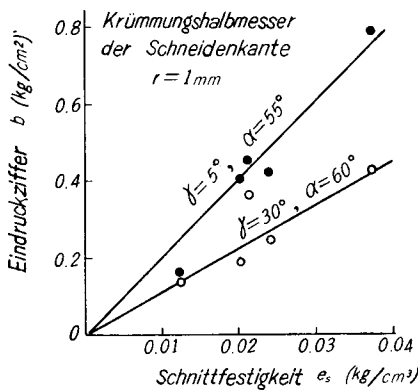


Bild 9. Beziehung zwischen Schnittfestigkeit und Eindrucksziffer.

ii) Schnittfestigkeit und Eindrucksziffer : Der Eindrucksziffer  $b$  stand mit der Schnittfestigkeit  $e_s$  in geradem Verhältnis (Bild 9). So kann man die Eindringungsfähigkeit aus der Prüfung von Schnittfestigkeit folgern.

iii) Schärfe der Schneidenkante und Eindrucksziffer : Wenn der Krümmungshalbmesser  $r$  der Schneidenkante zunahm, nahm der Eindrucksziffer außerordentlich zu (Bild 10). Diese Beziehung soll doch nach dem relativen Verhältnis zwischen der Bodenkorngröße und dem Krümmungshalbmesser der Schneidenkante verändert sein.

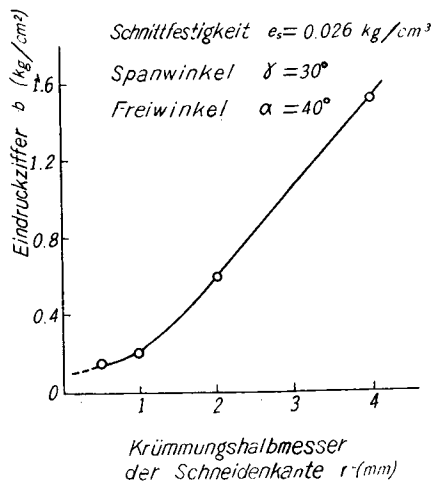


Bild 10. Beziehung zwischen Schärfe der Schneidenkante und Eindrucksziffer.

(3) Untersucht man die oben erwähnten Eigenschaften, so erhält man aus Gl. (2) und Gl. (3) für sandige Böden

$$N - k_1 e_s t^2 = k_2 e_s t \frac{dt}{dx} \dots\dots\dots (4)$$

wobei  $k_1 = 1,82 \times 10^{-0,45 \gamma} \times \text{tg}(\delta - \gamma)$ ,  $k_2$  den verhältnismäßigen Koeffizienten bedeutet, der aus Bild 9 gefunden werden kann. Integriert man Gl. (4), so ergibt sich (C ist Integralkonstant)

$$t^2 = \{N - C \cdot \exp(-2k_1 x/k_2)\} / k_1 e_s \dots\dots\dots (5)$$

i) Für  $k_1 > 0$  ( $\delta > \gamma$ ), nähert die finale Schnitttiefe zu einem gewissen Wert  $t_{\text{konst}}$  unter der zunehmenden Schnittstrecke:

$$t_{\text{konst}} = (N/k_1 e_s)^{\frac{1}{2}}$$

Die letzte Schnitttiefe  $t_{\text{konst}}$  nimmt verhältnismäßig mit der Eindruckkraft zu und gegensätzlich mit der zunehmenden Schnittfestigkeit des Bodens ab. Verwendet man dasselbe Schneidmesser, so erzeugt sich immer die konstante letzte Schnitttiefe unter dem konstanten Wert von  $N/e_s$ .

ii) Für  $k_1 = 0$  ( $\delta = \gamma$ ) ergibt sich

$$N = k_2 e_s t \frac{dt}{dx}$$

Die Schnitttiefe nimmt parabolisch mit zunehmender Schnittstrecke zu. In diesem Fall ist auch der ganze Schnittlauf immer gleich, insoweit der Wert von  $N/e_s$  konstant bleibt.

iii) Für  $k_1 < 0$  ( $\delta < \gamma$ ): Infolge vieler Experimente verändert sich der Wert von  $k_1$  kaum, sondern er bleibt in der Nähe der Null. Ist der Wert von  $N/e_s$  konstant, wie erwähnt, so bleibt sich der Schnittlauf immer gleich.

Aus diesen Ergebnissen erscheint es, daß aus der mit der Schnittfestigkeit in geradem Verhältnis stehenden Eindruckkraft des Schneidmessers die gleiche Eindringungsfähigkeit entsteht.

(4) Im unstationären Schneiden soll die Bodenreibung an die Schneidenkante auf den Horizontal-Komponenten des Schnittwiderstandes zugezählt werden:

$$H_R = (N \cdot B - V_\gamma) \text{tg} \delta = B \cdot b \cdot t \frac{dt}{dx} \text{tg} \delta \dots\dots\dots (6)$$

$H_R$  : Bodenreibung an die Schneidenkante in der horizontalen Richtung [kg]

$N$  : Eindruckkraft pro Längeneinheit der Breite des Schneidmessers [kg/cm]

$B$  : Breite des Schneidmessers [cm]

$V_\gamma$  : Vertikal-Komponente des Schnittwiderstandes [kg]

$\text{tg} \delta$  : Bodenreibungsziffer an die Schneidenkante

$b$  : Eindrucksziffer [kg/cm<sup>2</sup>]

$t$  : Schnitttiefe des Schneidens [cm]

$x$  : Schnittstrecke von Schnittpunkt [cm]



### Schnittvorgang des Greifers

Aus den oben erwähnten Untersuchungen hat es sich im folgenden gefunden: Mißt man die Schnittfestigkeit des Bodens, so kann man die Schnittfähigkeit des Bodens, den Schnittwiderstand gegen Schneidenwerkzeug und die Eindringungsfähigkeit des Bodens usw. beurteilen. In diesem Abschnitt handelt es sich mittels dieser Versuchsergebnisse um die Schnittvorgänge von Greifern.

Der Greifer, seit langem als Hebel- und Fördervorrichtung verwendet, hat auch Abteufen in beschränktem Ort und im Wasser zum wichtigen Zweck. Hierzu stellte Ninnelt<sup>3)</sup> nähere Untersuchungen an, aber er kam zu solchem Ergebnis nicht, daß der Schnittvorgang des Greifers durch Berechnung ausführlich erfunden werden kann.

Denkt man sich den etwas geschlossenen Greifer, wie in **Bild 11** in der Mittelebene geschnitten, so wirken folgende Kräfte an eine Greifer-Hälfte:

Die Seilzüge: Ist Anzahl der unteren Seilscheiben  $n$  und einzelne Seilspannung  $T$ , so wirkt  $nT$  an dem Punkt  $A$  des unteren Scheibenkastens nach oben ziehend und  $(n-1)T$  an dem Punkt  $D$  des oberen Scheibenkastens nach unten ziehend.

Das Greifereigengewicht  $G = G_0 + G_1 + G_2 + G_3$ : Es wirkt das Gewicht der einseitigen Schaufel  $G_0$  im Schaufel-Schwerpunkt  $G$ , des oberen Scheibenkastens  $G_1$  in dem Punkt  $D$ , des unteren Scheibenkastens  $G_2$  in dem Punkt  $A$  und der Druckstangen  $G_3$  in ihren Schwerpunkten.

Da die Verteilung des gegriffenen Bodens in der Schaufel nicht bekannt ist, sei sein Gewicht in dem Schaufel-Schwerpunkt angreifend gedacht.

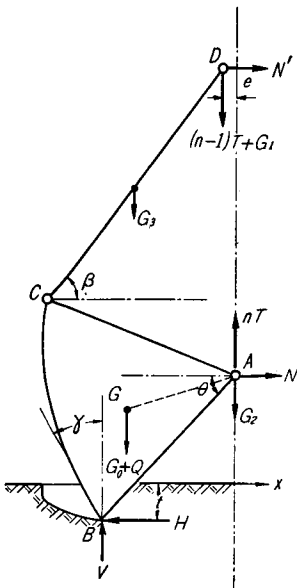


Bild 11. Am Greifer wirkende Kräfte.

Der Grabenwiderstand ist an der Schneidkante der Schaufel angreifend gedacht und zerlegt sich in seine Vertikal-Komponente  $V$  und Horizontal-Komponente  $H$ .

Die Reaktionen an den Drehpunkten  $A$  und  $D$ :  $N$  ist die an der unteren Scheibenachse angreifende horizontale Wirkungskraft und  $N'$  diejenige, die an der oberen Scheibenachse angreift.

Bezeichnen die Länge der Druckstange in der Papierebene  $l$ ,  $\overline{AB} = a$ ,  $\overline{AC} = c$ ,  $\overline{AG} = g$ ; den Winkel  $\beta$ , den die Druckstange jeweils mit der Horizontalen einschließt, den die Strecke  $\overline{AB}$  mit der Horizontalen eingeschlossenen Winkel  $\theta$ ,  $\angle BAC = \angle A$ ,

den die Strecke  $\overline{AB}$  mit der Spanfläche der Schaufelkante eingeschlossenen Winkel  $\angle B$ ,  $\angle BAG = \angle G$ , so ergibt sich aus der Gleichgewichtsbedingung für die Summe aller vertikalen Kräfte

$$V + T = G + Q \quad \dots\dots\dots(7)$$

Mit  $A$  als Drehpunkt läßt sich dann für die einzelne Greiferschaufel folgende Momentengleichung aufstellen :

$$\begin{aligned} &\{G_1 + G_3 + (n-1) T\} c \cdot \cos (A-\theta) + \{G_1 + \frac{1}{2}G_3 + (n-1) T\} c \cdot \sin (A-\theta) \operatorname{ctg} \beta \\ &+ (G_0 + Q) g \cdot \cos (\theta - G) - V a \cdot \cos \theta - H a \cdot \sin \theta = 0 \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

Aus Gl. (7) und Gl. (8) gilt die Beziehung

$$H = f(\theta) T + g(\theta) Q + h(\theta) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\left. \begin{aligned} f(\theta) &\equiv \{(n-1) c \cdot \cos (A-\theta) + (n-1) c \cdot \sin (A-\theta) \operatorname{ctg} \beta + a \cdot \cos \theta\} / a \cdot \sin \theta \\ g(\theta) &\equiv \{g \cdot \cos (\theta - G) - a \cdot \cos \theta\} / a \cdot \sin \theta \\ h(\theta) &\equiv \{(G_1 + G_3) c \cdot \cos (A-\theta) + (G_1 + \frac{1}{2}G_3) c \cdot \sin (A-\theta) \operatorname{ctg} \beta \\ &+ G_0 g \cdot \cos (\theta - G) - G a \cdot \cos \theta\} / a \cdot \sin \theta \\ \cos \beta &= \{c \cdot \cos (A-\theta) - e\} / l \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

hierbei ist  $e$  die horizontale Distanz zwischen den Punkten  $A$  und  $D$ .

Die Dimensionen des in dieser Untersuchung verwendeten Modelgreifers waren :

- $n = 5$ ;  $G_0 = 13,5 \text{ kg}$ ,  $G_1 = 4,0 \text{ kg}$ ,  $G_2 = 7,0 \text{ kg}$ ,  $G_3 = 3,0 \text{ kg}$ ,  $G = 27,5 \text{ kg}$ ;
- $l = 51,4 \text{ cm}$ ,  $a = 39,5 \text{ cm}$ ,  $c = 31,0 \text{ cm}$ ,  $g = 24,1 \text{ cm}$ ,  $e = 2,0 \text{ cm}$ ,
- Schaufelbreite  $B = 40,0 \text{ cm}$ ;  $\angle A = 60^\circ 04'$ ,  $\angle B = 73^\circ 08'$ ,  $\angle G = 25^\circ 15'$ .

Führt man diese Werte in Gl. (10) ein, so kann man  $f(\theta)$ ,  $g(\theta)$  und  $h(\theta)$  berechnen, wie in **Bild 12** dargestellt sind.

In Gl. (9) ließ man in jedem Gelenk des Greifers wirkende Reibung aus, aber ihr Wert war in Wirklichkeit ziemlich groß. Die gemessene Reibungswerte  $H_M$ , die in die an der Schneidenkante anzugreifende horizontale Widerstände umgerechnet worden sind, sind ebenfalls in **Bild 12** gezeigt.

Als horizontale Widerstände  $H$  ist der Schnittwiderstand des Bodens, der Einschubwiderstand des in der Schaufel schon gegriffenen Bodens und die Bodenreibung an die Schaufelfläche gedacht.

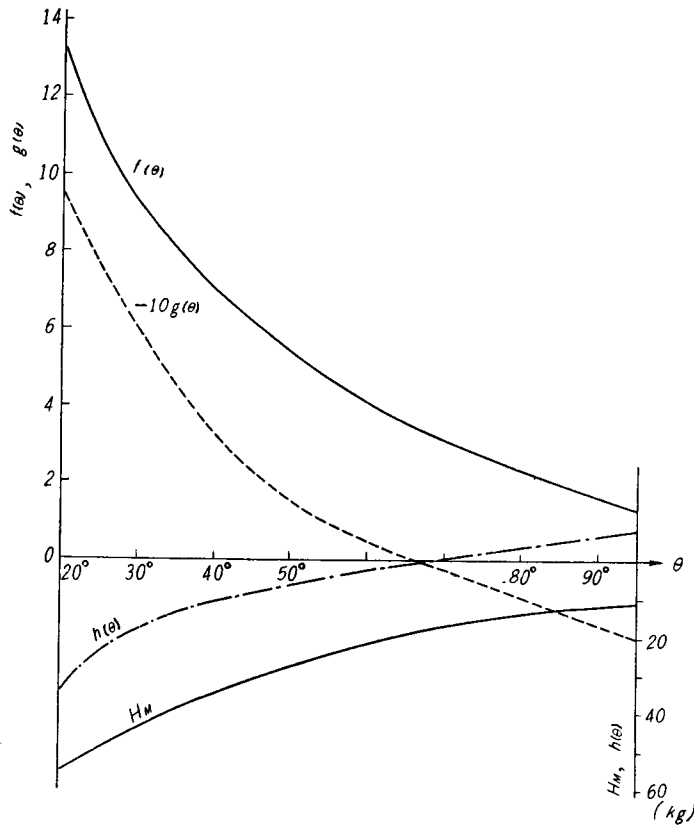


Bild 12. Werte von  $f(\theta)$ ,  $g(\theta)$ ,  $h(\theta)$  und  $H_M$ .

i) Der Schnittwiderstand  $H_\gamma$  ist, wie oben erwähnt, im folgenden dargestellt.

$$H_\gamma = 1,82 \cdot e_s \cdot B t^2 \cdot 10^{-0,45 \gamma} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$e_s$  : Schnittfestigkeit des Bodens [kg/cm<sup>3</sup>]

$B$  : Breite der Schaufelkante [cm]

$t$  : Schnitttiefe der Schaufelkante [cm]

$\gamma$  : Spanwinkel,  $\gamma = \angle B + \theta - \frac{\pi}{2}$  [Radian]

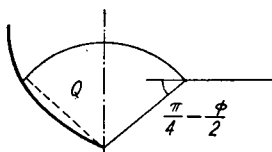


Bild 13. Einschlebungswiderstand des gegriffenen Bodens.

ii) Der Einschlebungswiderstand  $H_E$  verändert sich je nach den Volumen des gegriffenen Bodens. Angenommen, daß der in der Schaufel gegriffene Boden annähernd längs einer mit der Horizontale um den Winkel  $(\frac{1}{4}\pi - \frac{1}{2}\phi)$  eingeschlossenen, ebenen Gleitfläche aufgleitet, wie in Bild 13 gezeigt, so ergibt sich

$$H_E = 2Q \operatorname{tg} \left( \frac{1}{4} \pi + \frac{1}{2} \phi \right) \quad \dots\dots\dots(12)$$

$Q$  : Gewicht des gegriffenen Bodens [kg]

$$Q = B \gamma_G \int_0^x t \, dx$$

$\gamma_G$  : Raumgewicht des Bodens [kg/cm<sup>3</sup>]

$\phi$  : Winkel der inneren Reibung des Bodens [Radian]

iii) Die Reibung des Bodens an der inneren und äußeren Seitenfläche der Schaufel ließ man aus dem Grund aus, daß die Schnitttiefe nicht so groß ist und der an der Seitenfläche wirkende Erddruck ziemlich klein ist. An die Reibung des Bodens an der unteren Fläche der Schaufel kann man sich in gleicher Weise wie beim unstationären Schneiden denken, deshalb ergibt sich aus Gl. (6)

$$H_R = B b t \frac{dt}{dx} \operatorname{tg} \delta \quad \dots\dots\dots(13)$$

$H_R$  : Bodenreibung an der unteren Schaufelfläche [kg]

$B$  : Breite der Schaufelkante [cm]

$b$  : Eindrucksziffer [kg/cm<sup>2</sup>]

$t$  : Schnitttiefe [cm]

$x$  : Schnittstrecke der Schaufelkante von Anfangspunkt des Schneidens [cm]

$\operatorname{tg} \delta$  : Reibungsziffer des Bodens an der Schaufelfläche

Schließlich ergibt sich Gl. (9)

$$H_\gamma + H_E + H_R + H_M = f(\theta) T + g(\theta) Q + h(\theta) \quad \dots\dots\dots(14)$$

Aus Gl. (3) gilt

$$G + Q - V_\gamma - T = B b t \frac{dt}{dx} \quad \dots\dots\dots(15)$$

Dann ist:

$$\begin{aligned} \left\{ f(\theta) + \operatorname{tg} \delta \right\} b t \frac{dt}{dx} &= \left\{ g(\theta) + f(\theta) - \operatorname{tg} \left( \frac{1}{4} \pi + \frac{1}{2} \phi \right) \right\} \gamma_G \int_0^x t \, dx \\ &- 1,82 \cdot e_s t^2 10^{-0,45(\beta + \theta - \pi/2)} \left\{ 1 + f(\theta) \operatorname{tg} \left( \delta - \beta - \theta + \frac{1}{2} \pi \right) + W \cdot f(\theta) \right\} / B \\ &+ \{ h(\theta) - H_M \} / B \quad \dots\dots\dots(16) \end{aligned}$$

Integriert man Gl. (16) unter der Initial-Bedingung  $t=t_0$  für  $x=0$ , so kann man den Ort der Schaufelkante berechnen. Mit diesen Ergebnissen kann man auch aus Gl. (7) den Seilzug  $T$  finden. Bild 14 zeigt ein Versuchsergebnis, worin die Abszisse den Drehwinkel der Schaufel  $\theta$ , die obere Ordinate den Ort der Schaufelkante  $t$  und die untere Ordinate den Seilzug  $T$  und das gegriffene Bodengewicht  $Q$  aufweisen. Die in der Berechnung verwendete Werte waren:

$$\operatorname{tg} \delta = 0,365, \quad \phi = 30^\circ, \quad \gamma_G = 0,0018 \text{ kg/cm}^3, \quad e_s = 0,025 \text{ kg/cm}^3, \\ \text{Krümmungshalbmesser der Schneidenkante } r = 0,5 \text{ mm.}$$

Wie in Bild 14 gezeigt, stimmten die Versuchs- und die Berechnungsergebnisse fast überein.

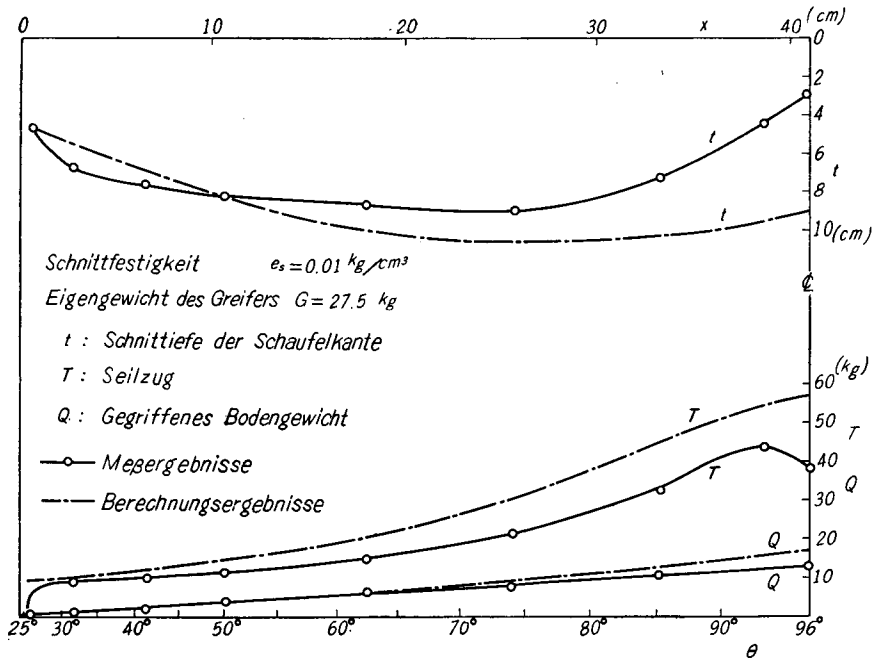


Bild 14. Schnittort  $t$ , gegriffenes Bodengewicht  $Q$  und Seilzug  $T$  für Versuchen und Berechnen mit Modelgreifer.

### Zusammenfassung

Zahlreiche Versuchen und Beobachtungen von unstationären Schneiden in sandigen Böden lieferten bisher die folgenden Ergebnisse:

(1) Den Schnittwiderstand des Bodens kann man durch die Prüfung der Schnittfestigkeit des Bodens berechnen, die an Ort und Stelle leicht geprüft werden kann.

(2) Schnitvorgang beim unstationären Schneiden, wobei die Schnitttiefe mit der Zeit verändert ist, unterscheidet von demjenigen beim stationären Schneiden, wobei die Schnitttiefe in einem ganzen Schnittlauf immer gleichbleibt.

(3) Zur Berechnung des Schnittort beim unstationären Schneiden spielt der Eindruckziffer des Schneidmessers eine große Rolle, der auf die Eindringungsfähigkeit des Schneidmessers weist.

(4) Der Eindruckziffer des Schneidmessers steht mit der Schnittfestigkeit des Bodens in geradem Verhältnis, hat die Minimalwert für den Spanwinkel von  $20^\circ \sim 30^\circ$  und für den Freiwinkel von  $30^\circ$  und mehr, und nimmt außerordentlich

mit zunehmendem Krümmungshalbmesser der Schneidenkante zu.

Mit den oben gefundenen Ergebnissen wurden Grabenvorgang des Modelgreifers untersucht, und das in den Greiferschaufeln gegriffene Bodengewicht und der in jedem Augenblick wirkende Seilzug konnten theoretisch behandelt werden.

Am Ende dankt der Verfasser herzlich dem verehrten Prof. Dr. Sakurō Murayama für seine freundliche Anleitung während der Ausführung dieser Untersuchungen.

#### **Schrifttum**

- 1) J. Rathje; Schnittvorgang im Sande, V. D. I. Forschungsheft 350 (1937)
- 2) S. Murayama und S. Hata; Proc. of the Japan Society of Civil Engg., 40, 3 (1955), pp. 94—100.
- 3) A. Ninnelt; Über Kraft- und Arbeitsverteilung an Greifern, besonders an Motorgreifern, A. Ziemsen Verlag, Mittenberg (1927)