

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Steinfeld, Karl

Über den Erddruck an Schacht- und Brunnenwandungen

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103150>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Steinfeld, Karl (1959): Über den Erddruck an Schacht- und Brunnenwandungen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 13. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 42-56.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Über den Erddruck an Schacht- und Brunnenwandungen

Von Dr.-Ing. Karl STEINFELD, Hamburg

Bei der Ermittlung des kleinsten Erddruckes auf zylindrische Schachtwände bei kohäsionslosem Boden setzt Terzaghi [1] voraus, daß die Art der Verformung des den Schacht umgebenden Erdstoffes auf ein Abscheren in zylinderförmigen Schnitten, also in lotrechten Gleitflächen, zurückzuführen ist. Bei dieser Berechnungsweise nimmt die Größe aller Spannungen in Richtung des Halbmessers gegen den Schacht ab, und der Erddruck wird durch die als Entlastung wirkende Ring- oder Tangentialverspannung wesentlich kleiner als auf eine ebene Wand.

Auch im Bergbau ist die Wirkung dieser Formänderung mittelbar oder unmittelbar in die Bemessung des Ausbaues eingeführt worden, und zwar durch Kastner [2], Schultze [3] und Mohr [4].

Mohr hat dabei die Spannungen in der Schachtwand einmal für eine nicht verformbare und zum andern für eine stark verformbare Wand ($\epsilon = 2\%$) ermittelt wie in Abb. 1 dargestellt. Ein unnachgiebiger Schachtausbau hat demnach weit höhere Kräfte aufzunehmen als ein weicher. Je mehr Ausdehnungsmöglichkeit aber dem Gebirge gegeben wird, desto mehr trägt es sich durch Ausbildung einer zusätzlichen Bodenverspannung selbst und umso schwächer kann der Ausbau sein.

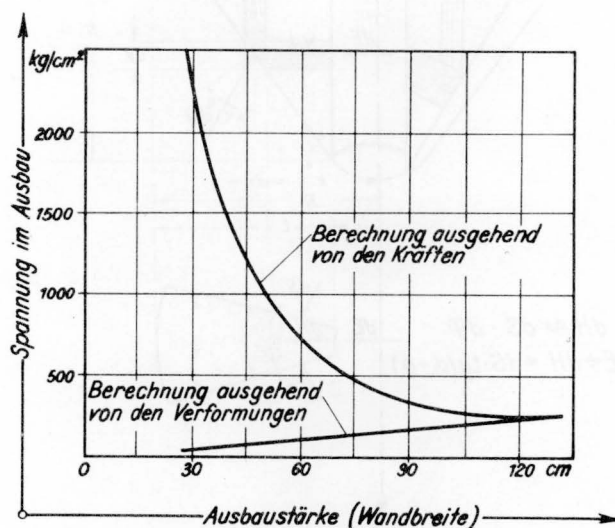


Abb. 1 Spannungen im kreisrunden Schachtausbau nach F. Mohr [4].

Die Entwicklung der vollen Reibung in der Gleitfläche und somit das Auftreten des Erddruckes setzt stets eine geringe Bewegung des Gleitkörpers gegen den Stützkörper voraus. Der Gleitkörper kann dieser Bewegung aber nicht wie beim Erddruck auf eine ebene Wand verformungsfrei folgen. Daher müssen in tangentialer Richtung zusätzlich seitliche Erdkräfte auftreten. Ihre veränderliche Größe soll durch den Beiwert λ_s der Seitenkraft des Erddruckes ausgedrückt werden.

In Anlehnung an das kritische Hauptspannungsverhältnis der Mohrschen Bruchhypothese ist dieser Beiwert λ_s die Verhältniszahl zweier Normalspannungen eines räumlichen Verformungszustandes. Er stellt das Verhältnis zwischen der waagerechten Tangentialspannung und der lotrechten Auflastspannung dar. Seine Größe bewegt sich in den Grenzen $1 \geq \lambda_s \geq 0$ entsprechend den oben angeführten Grenzwertermittlungen von Terzaghi und Lorenz. Die wirkliche Größe des Beiwertes hängt von der Lagerungsdichte und der Zusammendrückbarkeit des Bodens und von Richtung und Größe der Bewegung des Gleitkörpers ab, also auch von der Verformbarkeit der Schachtwandung.

Aus den geometrischen Zusammenhängen (Abb.2) ergibt sich folgende Gleichung für den Erddruck auf die Flächeneinheit:

$$e = \frac{dE - dH}{dF} = \frac{\gamma}{\text{tg} \alpha} \left[\left(\frac{h}{r} y + y \text{tg} \alpha - \frac{1}{2} y^2 \right) \frac{\text{tg}(\alpha - \varrho)}{\text{tg} \alpha} - \lambda_s \left(\frac{h}{r} y - \frac{1}{r} y^2 \right) \right] \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^2} \right] \quad (1a)$$

Integriert man die Gleichung (1a) über die Höhe, so ergibt sich die Gleichung (2) für den Erddruck

$$E = \int_0^h e \cdot dy = \gamma h^2 \frac{1}{\text{tg} \alpha} \left[\left(\frac{1}{6} \cdot \frac{h}{r} + \frac{1}{2} \text{tg} \alpha \right) \frac{\text{tg}(\alpha - \varrho)}{\text{tg} \alpha} - \lambda_s \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{h}{r} \right] \left[\frac{\text{t}}{\text{m}} \right] \quad (2)$$

Integriert man die Gleichung (1a) doppelt über Höhe und Umfang, so ergibt sich die Gleichung (3) für die gesamte Kraft, die auf den Schacht wirkt:

$$K_E = \int_0^h \int_0^{2\pi} e \cdot dy \cdot r \cdot d\varphi = \pi \cdot \gamma h^2 \left[\left(\frac{h}{3 \text{tg}^2 \alpha} + \frac{r}{\text{tg} \alpha} \right) \text{tg}(\alpha - \varrho) - \lambda_s \frac{h}{3 \text{tg} \alpha} \right] \left[\text{t} \right] \quad (3)$$

Für die Gleitflächenneigung erhält man aus der nach α differenzierten und gleich Null gesetzten Gleichung (2) die Gleichung (4), aus der die Gleitflächenneigung α für das jeweilige λ_s in Abhängigkeit von den Schachtabmessungen ermittelt werden kann.

$$\frac{dE}{d\alpha} = 0$$

$$\begin{aligned} & \text{tg}^3 \alpha \left(\lambda_s \cdot \frac{h}{r} \text{tg} \varrho - 3 \right) + \text{tg}^2 \alpha \left(2 \lambda_s \frac{h}{r} + 6 \text{tg} \varrho - 2 \frac{h}{r} \right) + \text{tg} \alpha \left(3 \frac{h}{r} \text{tg} \varrho + 3 + \frac{\lambda_s^{-1}}{\text{tg} \varrho} \cdot \frac{h}{r} \right) + \\ & + 2 \frac{h}{r} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Die Gleichungen sollen nicht im einzelnen erläutert werden. Es sei jedoch hervorgehoben, daß die Gleichungen (2) und (4) von Karafiath [7] schon im Jahre 1953 in anderer Form aufgestellt worden sind. Weiter sei darauf hingewiesen, daß die Gleichungen (1a) bis (3) jeweils aus einem positiven Teil bestehen und aus einem negativen, der von λ_s abhängt und damit den verkleinernden Einfluß der Ringspannung zeigt.

Mit der Gleichung (1a) kann der Erddruck auf die Flächeneinheit für jede Schachtabmessung und jeden Seitendruckbeiwert bei gegebenem Scherwinkel und Raumgewicht des Bodens ermittelt werden.

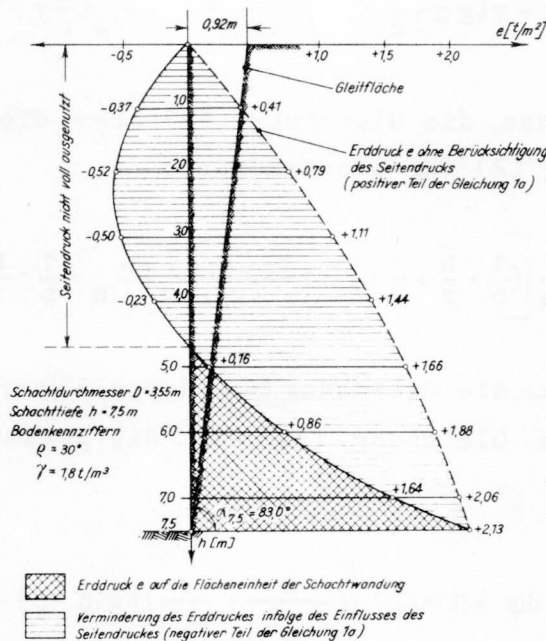


Abb.3 Erddruck auf eine Schachtwand für $\lambda_s = 1$

Ein Beispiel für $\lambda_s = 1,0$ ist in Abb.3 dargestellt. Für die dort angegebenen, willkürlich gewählten Werte ergibt Gleichung (4) eine Gleitflächenneigung von $\alpha = 83^\circ$ (strichpunktierte Linie). Die stark ausgezogene Linie stellt den Erddruck aus diesem steil geneigten Gleitkörper dar, sie ist aus Gleichung (1a) punktweise ermittelt. Der Erddruck wird erst in größerer Tiefe auf die Schachtwand wirksam. Bis zu einer Tiefe von etwa 4,6 m ist er negativ, d.h. die entlastende Wirkung des Seitendruckes wird nicht voll ausgenutzt. Der Größtwert tritt am Fuß des Gleitkörpers auf, wo Angriffsfläche des Seitendruckes und Gleitfläche ihren Kleinstwert erreichen.

Die gestrichelte Linie kennzeichnet den Einfluß des Seitendruckes. Sie ist die Verbindung aller Punkte, die sich aus Gleichung (1a) ohne den negativen Teil ergeben. Die stärkste Seitendruckentlastung tritt etwa in halber Höhe des Schachtes auf; wiederum anschaulich, weil die Seitenkraft als Produkt aus Auflast und Querschnitt des Gleitkörpers hier ihren Größtwert erreicht.

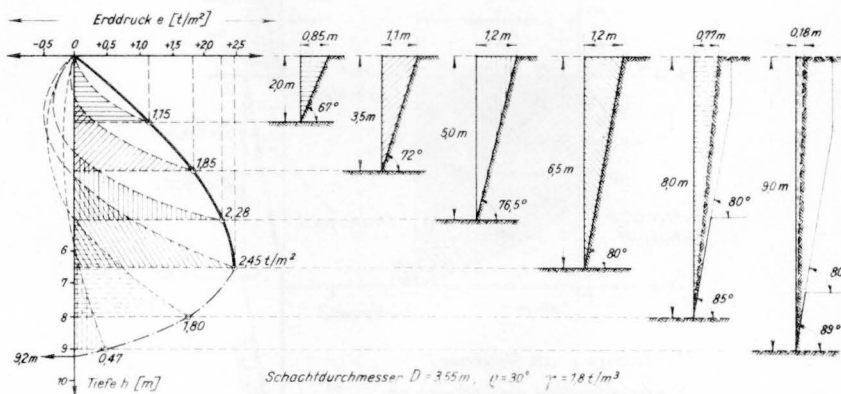


Abb.4 Erddrucke und Gleitflächenneigung α in verschiedenen Schachttiefen für $\lambda_s = 1$

In Abb. 4 sind Erddruck und Gleitflächen für verschiedene Schachttiefen dargestellt. Die Gleitflächenneigung nimmt von der des ebenen Erddruckes (unendlich großer Schachtdurchmesser) mit 60° in endlicher Tiefe bis auf 90° zu. Die zusammengestellten Erddrucklinien zeigen deutlich, daß die Schachtwand nicht nach dem Erddruck aus nur einem Gleitkörper, sondern nach der Umhüllenden aller Erddrucklinien bemessen werden muß. Praktische Bedeutung hat diese Hüllkurve jedoch nur bis zu der Tiefe, in der der Größtwert des

Erddruckes auftritt - im vorliegenden Falle bei etwa 6,5 m Tiefe. Die entsprechende Gleitflächenneigung beträgt $\alpha = 80^\circ$. Gleitkörper mit ebenen Gleitflächen in steilerer Neigung ergeben kleinere Erddruckwerte (s.auch Abb. 3). Wahrscheinlich treten mit zunehmender Tiefe konkav gekrümmte oder gebrochene Gleitflächen mit einer Fußneigung von ebenfalls 80° auf, wie in Abb.4 rechts angedeutet.

Zur Erörterung der Abhängigkeit des Erddruckes von der Tiefe bei derart gebrochenen Gleitflächen dient Abb.5. Wird die Schachtwand durchgehend nach dem größten Erddruck bemessen ($2,45 \text{ t/m}^2$, gestrichelte senkrechte Linie), so hat man im oberen Bereich der Wand eine beträchtliche Reserve gegenüber dem dort wirksamen Erd-

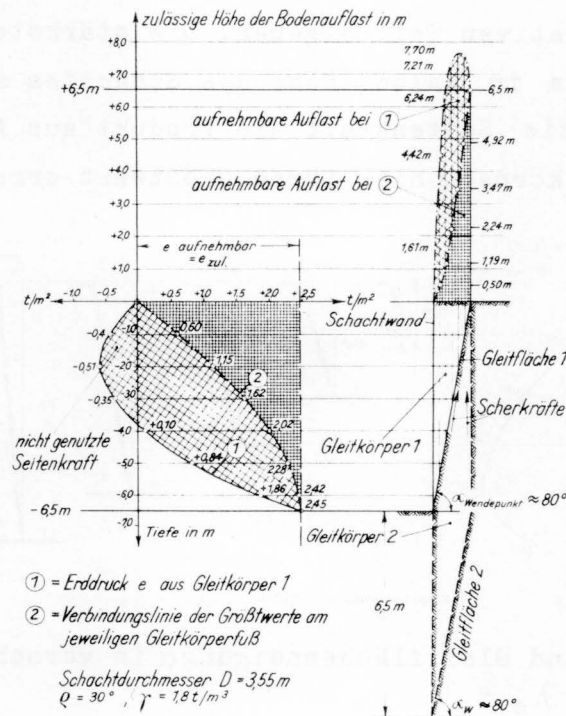


Abb. 5 Zulässige Auflast bei einer nach dem Größtwert des Erddruckes bemessenen Schachtwand

druck. Diese Reserve ist hier einfach näherungsweise über die geometrischen Verhältnisse an der Gleitfläche in senkrechte Belastung umgesetzt. Für die der Tiefe von 6,5 m zugeordnete Gleitfläche und den sich daraus ergebenden Erddruck (Linie 1) entsteht die strichpunktierte Auflastlinie, deren Größtwert bei einer 7,7 m hohen Bodenauflast liegt. Betrachtet man die (umhüllende) Größtwertkurve

des Erddruckes nach Abb.4 als Belastungslinie (Linie 2), so ergibt sich aus der waagerechten Belastungsreserve eine Bodenauflast bis 6,5 m Höhe (karierte Flächen).

Der Vergleich mit der Gleitfläche 2 und dem zugehörigen Gleitkörper zeigt, daß selbst in größerer Tiefe die Schachtwand nicht stärker bemessen werden muß, weil sie immer nur von einem Gleitkörper belastet wird, der nicht größer ist, als der erste Gleitkörper einschließlich seiner Auflast. Scherkräfte in den Begrenzungsflächen des oberen Teiles des Gleitkörpers, wie sie etwa Ehlers im Jahre 1910 [8] für Hamburger Bohlwerke eingeführt hat, werden dabei nicht einmal berücksichtigt. Eine zusätzliche Seitendruckentlastung (Ringverspannung) ist wegen der senkrechten Gleitfläche in diesem oberen Bereich nicht möglich.

Diese Überlegung gilt ebenso für jeden tieferen Gleitkörper, woraus zu schließen ist, daß der Erddruck auch in größerer Tiefe den genannten Größtwert nicht überschreitet.

Durch Untersuchung verschiedener Gleitflächen in verschiedenen Tiefen ist festgestellt worden, daß jeweils der Erddruck am Fuße der Gleitfläche den Größtwert darstellt. Die Gleichung (1a) kann dadurch wesentlich vereinfacht werden. Setzt man in ihr $y = h$, so erhält man für jede Gleitfläche

$$e_{\text{Fuß}} = \gamma \cdot h \frac{\text{tg}(\alpha - \rho)}{\text{tg} \alpha} \quad \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^2} \right] \quad (1b)$$

Darin stellt α den Wert dar, der sich aus der Bestimmungsgleichung (4) für die Gleitflächenneigung ergibt.

In Abb.6 ist für den Seitendruckbeiwert $\lambda_s = 1$ und für verschiedene ρ -Werte die Gleitflächenneigung α in Abhängigkeit von h/r aufgetragen. Die Linien haben dort, wo sich - entsprechend Abb. 4 - rechnerisch der Größtwert der Umhüllenden der Erddrücke am Schachtfuß ergibt, einen Wendepunkt. Die Linie für den in der bisherigen Rechnung verwendeten Wert $\rho = 30^\circ$ zeigt ihren Wendepunkt bei $\alpha = 80^\circ$, das Verhältnis der Schachttiefe zum Schachthalbmesser beträgt 3,66 entsprechend den bisher verwendeten Werten von 6,5 m für die Tiefe und 3,55 m für den Schachtdurchmesser.

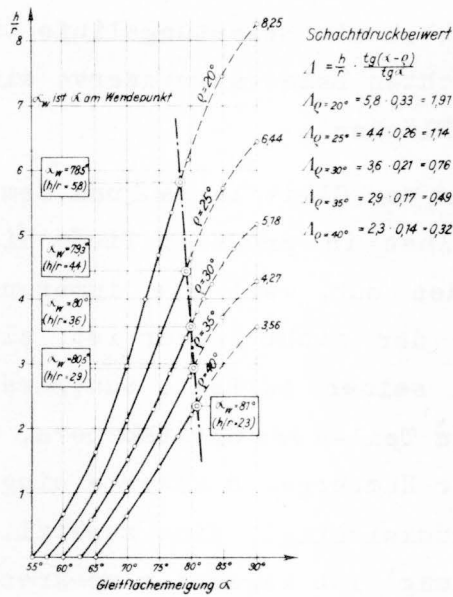


Abb. 6 Gleitflächenneigung α in Abhängigkeit von h/r und ϱ für $\lambda_s = 1$

Für Verhältnisse h/r , die unterhalb der Wendepunkte liegen, kann der Erddruck am Schachtfuß jeweils mit Hilfe der Gleichung (1a) und der in Abb. 6 ablesbaren α -Werte berechnet werden. Für alle Schächte, deren Verhältnis h/r über dem Wendepunkt liegt, kann der für die Berechnung maßgebende größte Erddruck aus der Gleichung (1b) ermittelt werden, wenn als α die Gleitflächenneigung α_w am Wendepunkt und für h der dem Winkel α_w entsprechende Wert aus Abb. 6 eingeführt wird. Setzt man

$$\frac{h}{r} \cdot \frac{\text{tg}(\alpha - \varrho)}{\text{tg} \alpha} = \Lambda$$

so verkürzt sich die Gleichung (1b) weiter auf

$$e_{\max} = \Lambda \cdot \gamma \cdot r \quad \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^2} \right] \quad (1c)$$

Der Wert Λ soll als Schachtdruckbeiwert bezeichnet werden, er ist nur von den Bodeneigenschaften abhängig. Gleichung (1c) ergibt den Bemessungswert für jeden Schachtdurchmesser unabhängig von der Schachttiefe.

Den Wert $\operatorname{tg}(\alpha_w - \rho) / \operatorname{tg} \alpha_w$ kann man auch mit dem Erddruckbeiwert λ_a vergleichen. Er ist nur sehr viel kleiner als λ_a , für $\rho = 20^\circ$ ergibt er sich zu 0,33 ($\lambda_a = 0,49$), für $\rho = 40^\circ$ fällt er schon auf 0,14 ($\lambda_a = 0,22$) ab.

Zum Vergleich sei erwähnt, daß die Bergleute für den Schachtdruck mit dem 0,3-fachen Wert des hydrostatischen Druckes rechnen, also mit beständiger linearer Zunahme des Schachtdruckes. Bei einem Raugewicht von 2 t/m^3 für den Erdstoff ergäbe sich ein hydrostatischer Beiwert von 0,15.

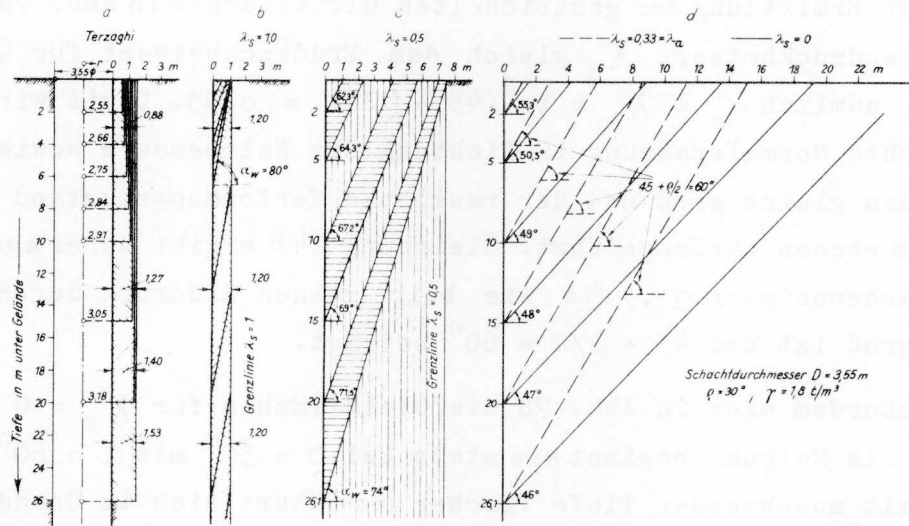


Abb.7 Gleitkörper nach Terzaghi und nach der klassischen Theorie

Abb. 7 zeigt den Einfluß des Seitendruckbeiwertes auf die Gleitkörperausdehnung. Abb. 7a zeigt die Gleitbereiche aus Zylinderschnitten, die sich nach dem Berechnungsverfahren von Terzaghi ergeben. Auch Terzaghi baut auf $\lambda_s = 1,0$ auf. Die Breite der Gleitzone ist bei einer Tiefe von 2 m etwa 80 cm und nimmt bis zur Tiefe von 26 m auf 1,50 m zu.

In Abb. 7b ist der Gleitkörper nach der klassischen Theorie für $\lambda_s = 1$ dargestellt. Die Gleitflächenneigung nimmt bis zu dem Größtwert bei 6,5 m Tiefe zu, darunter sind die in Abb.2 dargestellten prismatischen Gleitkörper mit einer unveränderlichen Brei-

te von 1,2 m eingetragen. Der Vergleich der Abb. 7a und 7b zeigt eine gute Übereinstimmung.

Gestattet die geringere Verformung einer steiferen Schachtwand oder eine lockere Lagerung des umgehenden Bodens nur eine Tangentialverspannung bis zu dem Beiwert der Seitenkraft des Erddruckes $\lambda_s = 0,5$, so ergibt sich eine Gleitkörperausdehnung nach Abb. 7c. Von 60° beginnend steigen die Gleitflächen auch hier wieder allmählich steiler bis $\alpha_w = 74^\circ$ an. Für größere Tiefen ergibt sich eine unveränderliche Gleitkörperbreite von etwa 7,40 m, die entsprechend Abb. 7b wieder parallel zur Schachtwand angenommen wird.

Zur Ermittlung der gestrichelten Gleitflächen in Abb. 7d wurde der Seitendruckbeiwert λ_s gleich dem Erddruckbeiwert für $\varrho = 30^\circ$ gesetzt, nämlich $\lambda_s = \lambda_a = \text{tg}^2(45 - \varrho/2) = 0,33$. Damit wird die waagerechte Normalspannung in Richtung des Halbmessers sowie senkrecht dazu gleich groß und der räumliche Verformungszustand wieder auf einen ebenen zurückgeführt. Gleichung (4) ergibt daher auch eine Gleitflächenneigung α , die wie beim ebenen Erddruck durchgehend gleich groß ist und $45 + \varrho/2 = 60^\circ$ beträgt.

Außerdem sind in Abb. 7d die Gleitflächen für $\lambda_s = 0$ eingetragen. Die Neigung beginnt wie stets bei $\varrho = 30^\circ$ mit $\alpha = 60^\circ$, wird jedoch mit zunehmender Tiefe flacher und nähert sich im Unendlichen der Neigung von 45° . In 26,1 m Tiefe hat die Gleitfläche schon eine Neigung von 46° .

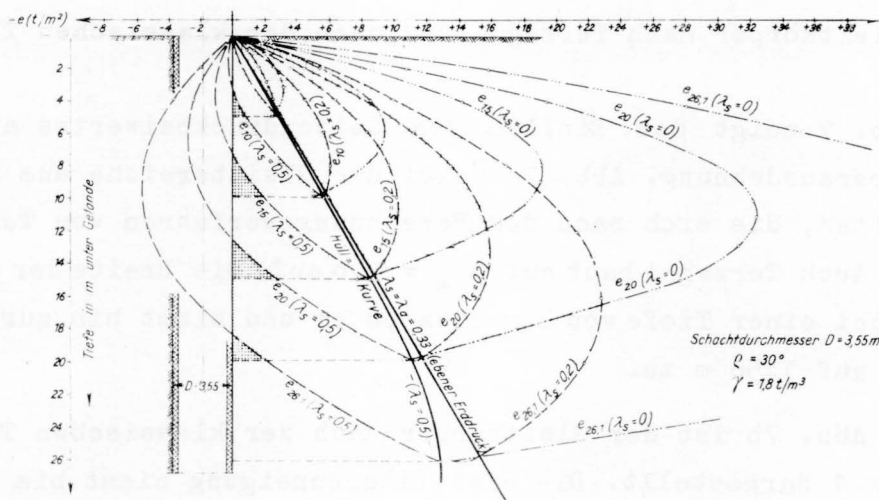


Abb. 8 Erddruck e für verschiedene Gleitflächen und verschiedene λ_s -Werte

Abb. 8 zeigt den Verlauf des Erddruckes e auf die Flächeneinheit für die verschiedenen Gleitflächen der kleineren λ_s -Werte. Bei $\lambda_s = 0,5$ haben alle Erddrucklinien aus den einzelnen Gleitflächen einen ähnlichen Verlauf wie bei $\lambda_s = 1,0$ (Abb.4). Der Größtwert der Umhüllenden tritt jedoch erst in 26 m Tiefe auf. Diese Erddrucklinie weicht bis zu dieser Tiefe nicht wesentlich vom ebenen Erddruck ab und wird darunter entsprechend den vorausgesetzten Gleitkörpern (Abb.5 und 7) senkrecht angenommen.

Der Erddruckverlauf für $\lambda_s = \lambda_a$ entspricht auch nach Gleichung (1c) dem ebenen Erddruck. Die Seitendruckentlastung ist gleich Null.

Für λ_s -Werte, die kleiner sind als $\lambda_a = 0,33$, hat der Erddruck e auf die Flächeneinheit nicht mehr den Größtwert am Schachtfuß. Die Gleichung (1c) ist deshalb zur Erfassung dieses Grenzwertes nicht mehr zulässig. Es muß wieder mit Gleichung (1a) gerechnet werden. Der Erddruck braucht aber nur für die Endtiefe des Schachtes berechnet zu werden, weil die Erddrucklinien aller kleineren Verhältnisse h/r des Schachtes von der Endlinie eingeschlossen werden.

Mit Werten $\lambda_s < \lambda_a$ wird auch der gesamte Erddruck auf die Schachtwand größer als der ebene Erddruck. Vorstellen kann man sich diesen Vorgang wohl nur so, daß z.B. Zwangskräfte aus einem Brunnenmantel auf den umgebenden Boden einwirken und den Ringdruck durch beginnende Verdrängung des Bodens verkleinern. Damit wird die waagerechte Hauptspannung senkrecht zum Halbmesser kleiner als die in Richtung des Halbmessers. Die Seitendruckentlastung wirkt sich dann negativ aus und vergrößert den Erddruck e auf die Schachtwand.

Abb. 9 soll den Einfluß der Größe des Seitendruckbeiwertes λ_s noch deutlicher herausheben. Die Kurve für $\lambda_s = 1,0$ ist schon in Abb. 6 enthalten. Die senkrechte Linie über der Abszisse $\alpha = 60^\circ$ ist die Bestimmungskurve für $\lambda_s = \lambda_a = 0,33$. Sie zeigt, daß die Gleitflächenneigung hier unabhängig von der Tiefe des Schachtes bleibt. Die Senkrechte scheint auch

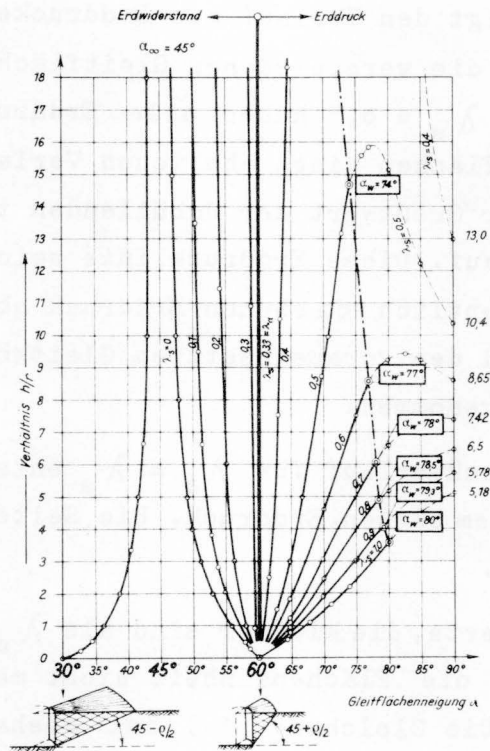


Abb. 9 Gleitflächenneigung α in Abhängigkeit von h/r und λ_s für $Q 30^\circ$

die Trennlinie zwischen Erddruck und einer Sonderform des Erdwiderstandes zu sein. Der "ebene" Erddruck ergibt offenbar den Größtwert des Erddruckes auf die unendlich starre Schachtwand.

Die Linien für die Werte $\lambda_s < \lambda_a$ zeigen, daß die Gleitflächenneigung mit der Tiefe abnimmt. Sie liegen in einem dem Erdwiderstand ähnlichen Bereich, der bei Verklemmungen und Verkantungen des Schachtkörpers durchaus vorkommen kann. Die Kurve $\lambda_s = 0$ ergibt im Unendlichen die gleiche Gleitflächenneigung von $\alpha = 45^\circ$ [5], wie sie auch für die Gleitflächenneigung beim echten dreh-symmetrischen Erdwiderstand, bei dem der Gleitkörper nach außen und oben verdrängt wird, auftritt [6]. Die Bestimmungslinie dafür, vergleichsweise in Abb. 9 mit aufgeführt, hat ihren Ursprung in der entsprechenden Neigung des ebenen Erdwiderstandes von

$$\alpha = 45 - Q/2 = 30^\circ.$$

Bei den Linien $\lambda_s > \lambda_a$ steigt die Gleitflächenneigung mit der Tiefe an. Alle Linien zeigen Wendepunkte und damit Größtwerte des Erddruckes e in endlicher Tiefe, wie schon in Abb.4 und 6 dargestellt.

Abb. 9 gibt auch einen bedingt gültigen Aufschluß darüber, wie stark der zu erwartende Erddruck von der Nachgiebigkeit der Schachtwand oder der Lagerungsdichte des umgebenden Bodens abhängt. Bei starren Schachtwänden und locker gelagerten Böden ist mit geringer Ringverspannung (etwa $0,5 \leq \lambda_s \leq 0,7$) und bei nachgiebigen Schachtwänden bzw. großer Lagerungsdichte des Bodens mit einer großen Seitendruckentlastung ($\lambda_s = 1,0$ zu rechnen).

Abb. 10 zeigt den Verlauf der Erddrucklinien nach Terzaghi und nach der klassischen Theorie für Werte $\lambda_s > 0,5$. Die Linien 1 (Terzaghi) und 2 (klassische Theorie) gelten für $\lambda_s = 1,0$. Im oberen Bereich ist der Erddruck e nach der klassischen Theorie größer, mit zunehmender Tiefe werden die Terzaghischen Werte größer. Die Unterschiede hängen von den Ausgangsannahmen für die Gleitbereiche und die Wandreibung ab, sowie von mathematischen Vereinfachungen, die hier nicht näher erörtert werden sollen.

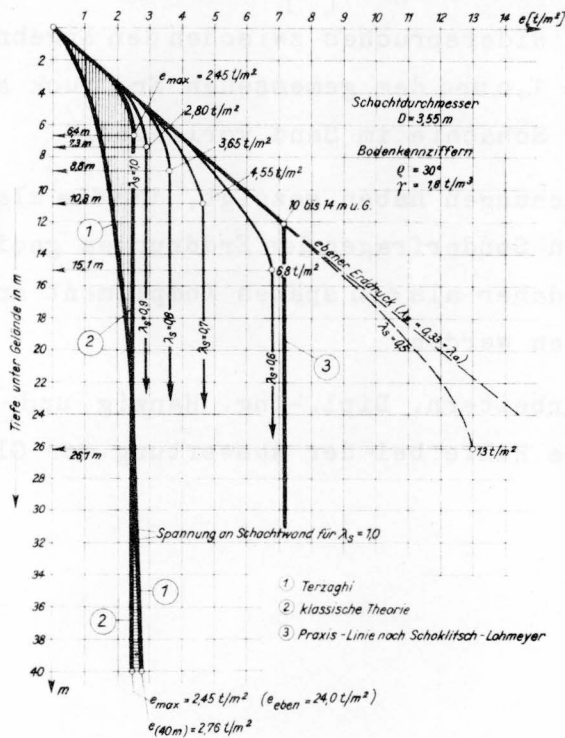


Abb.10 Erddruck auf die Schachtwand nach Terzaghi und nach der klassischen Theorie in Abhängigkeit von λ_s

Für kleiner werdende λ_s -Werte nimmt der Erddruck e allmählich zu. Die Tiefen, in denen die Linien ihren Größtwert erreichen, sind an der Ordinate angegeben. Die Kurve für $\lambda = 0,6$ stimmt etwa überein mit der in den Grundbaubüchern von Schoklitsch [9] und Brennecke - Lohmeyer [10] angegebenen Größe des Erddruckes auf Schächte. Beide Verfasser haben schon vor etwa 25 Jahren empfohlen, bei der Schachtberechnung bis zu etwa 10 - 14 m Tiefe mit dem "ebenen" Erddruck zu rechnen und ihn in größerer Tiefe als unveränderlich anzunehmen. Diese seinerzeit aus der Erfahrung gewonnene Erddrucklinie hat auch heute noch für jede Abteufung mit steiferem Ausbau Gültigkeit. Sie ist hier also nur rechnerisch belegt.

Für besonders nachgiebige, wie z.B. getriebegezimmerte Schächte erscheinen darüber hinaus die Erddrucklinien für $\lambda_s = 1,0$ zulässig. Derartige Schächte wurden seit alters her in großer Zahl bis zu 60 m Tiefe und mehr abgeteuft. Gewöhnlich wurde dabei nur eine Pfählung von einzölliger Stärke verwendet. Obgleich die Holzspannung dabei auch nach den Erddrucklinien für $\lambda_s = 1,0$ stellenweise das heute zulässige Maß überschritten hat, sind bei vorschriftsmäßiger Ausführung alle getriebegezimmerten Schächte standfest geblieben. Auch Terzaghi [1] erwähnt, daß bis jetzt keine Beweise irgendeines Widerspruches zwischen den Ergebnissen seiner Berechnung für $\lambda_s = 1,0$ und dem gemessenen Erddruck auf die Auskleidung ausgeführter Schächte im Sand vorliegen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die klassische Theorie auch zur Lösung von Sonderfragen des Erddruckes geeignet ist. Mögen die Ausführungen daher als ein spätes Kompliment an die klassische Theorie aufgenommen werden.

Meinen Mitarbeitern, Dipl.-Ing. Hanzig und Dipl.-Ing. May, danke ich für ihre Hilfe bei der Auswertung der Gleichungen.

Schrifttum

- [1] Terzaghi-Jelinek: Theoretische Bodenmechanik
Abschnitt 73 und 74, S. 205-218, Berlin 1954,
Springer-Verlag.
- [2] Kastner, H.: Über den echten Gebirgsdruck beim Bau tief-
liegender Tunnel.
Österreichische Bauzeitschrift 4(1949), Heft
10, S. 157-159, Heft 11, S. 179-183.
- [3] Schultze, E.: Die Verwendbarkeit von Beton im Schachtbau.
Mitteilungen aus dem Institut für Verkehrs-
wasserbau, Grundbau und Bodenmechanik der
Technischen Hochschule Aachen, Heft 7, Aachen
1953.
- [4] Mohr, F.: Kraft und Verformung in der Gebirgsmechanik
untertage.
Vorträge der Baugrundtagung 1956 in Köln,
Hamburg 1957, Eigenverlag der Deutschen Ge-
sellschaft für Erd- und Grundbau e.V.
- [5] Lorenz, H.: Brunnengründungen.
Abschnitt 2.09 im Grundbautaschenbuch, Ber-
lin 1955, Verlag von Wilhelm Ernst u. Sohn.
- [6] Steinfeld, K.: Über den räumlichen Erdwiderstand.
Mitteilungen der Hannoverschen Versuchs-
anstalt für Grundbau und Wasserbau, Franzius-
Institut der Technischen Hochschule Hannover
Heft 3, S. 51-153, Hannover 1953, Eigenverlag
- [7] Karafiath, L.: On some Problems of Earth Pressure.
Acta Technica Academiae Scientiarum Hunga-
riae, Band 7, Heft 3-4, Budapest 1953, Ver-
lag Adademiai Kiado, Budapest V.
siehe auch: Erddruck auf Wände mit kreis-
förmigem Querschnitt, Bauplanung-Bautechnik
7(1953), S. 319-320.
- [8] Ehlers, H.: Beitrag zur statischen Berechnung von Spund -
wänden unter Berücksichtigung besonderer
örtlicher Verhältnisse.
Zeitschrift für Architektur und Ingenieur-
wesen 1910, Heft 1.
- [9] Schoklitsch: Der Grundbau.
1. Aufl., S. 380, Wien 1932, Springer-Ver-
lag.
- [10] Brennecke-Lohmeyer: Der Grundbau.
4. Aufl., Band III, S. 168, Berlin 1934,
Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn.