

UNTERSUCHUNG DES STRASSENUNTERGRUNDES*

- a) Bestimmung der Eigenschaften des Untergrundes. Untersuchungsverfahren und Messeinrichtungen.
- b) Einfluss dieser Eigenschaften auf Bau (Unterbau und Belag) und Unterhaltung der Strassen.

Die Trassierung von Sickerschlitzen

Die Linienführung der *Autobahnen* unterscheidet sich kaum von jener der *Hauptseisenbahnen*. Zu ihrer gemeinsamen Charakteristik gehören grosse Krümmungshalbmesser, kleine Steigung, weshalb sie sich entgegen den älteren Strassen dem Gelände nicht anschmiegen können. Ihre Herstellung bedingt daher sehr bedeutende Erdarbeiten. 15–20 m hohe Dämme und Einschnitte an den heutigen Autobahnen gehören nicht zur Seltenheit. Dergleiche gewaltige Erdarbeiten können *in Bezug auf ihre Standfestigkeit unter denselben Mängeln leiden*, die auch die Linien der Vollbahnen so oft gefährden und es kommt immer häufiger vor, dass man mit dem Bau von Autobahnen verbunden über das *Rutschen mächtiger Erdmassen* hört und liest.

Diese Erdbewegungen sind in den meisten Fällen auf die Gegenwart von bedeutenden *Grundwassermengen* als unmittelbare Ursache zurückzuführen, die auf irgend eine Weise in den Erdkörper gelangt, die *Kohäsion und Reibung* des Bodens vermindern und dadurch ein Rutschen des Bodens begünstigen. Die einfachste Massnahme zum Aufhalten der in Bewegung geratenen Erdmassen bietet sich in der Steigerung der inneren Widerstände, d. h. in der *Vermehrung der Reibung und Kohäsion durch Austrocknen* des Bodens. Das wirksamste Mittel zum Austrocknen des Bodeninneren besteht in der Anlegung eines *Sickergrabennetzes* aus *Stollen* und *Schächten* bestehend, durch dessen Steinpackungen entsprechende Lüftung des Bodens und rasche Verdunstung des Grundwassers herbeigeführt wird. Die mit der Austrocknung verbundene Zunahme des Scherwiderstandes erzeugt in der Umgebung der Sickerschlitze eine je nach der Bodenart 5–20 m starke *trockene Erdmauer* mit grossem Kohäsionswiderstand. Durch das Anordnen von Sickerschlitzen *in angemessener Dichte* und an richtigen Stellen wird ein aus dem Bodenmaterial entstandenes *Stützmauer-System* erzielt, das spätere Rutschungen verhindert.

Der Bau von in grosser Tiefe angelegter, durch Verspreitzung gesicherter und mit Steinpackung versehener Schlitze ist mit grossem Kostenaufwand verbunden und ist nur dann von Erfolg begleitet, wenn die Schlitze *an richtiger Stelle* und *in gehöriger Tiefe* angeordnet werden.

* Internationaler Ständiger Verband der Strassen-Kongresse. VIII. Kongress — Haag 1938. Bericht von Dr. Josef Jáky.

Die *Linienführung* der Sickerschlitzte betreffend war man in der Vergangenheit auf die Beobachtungen erfahrener und auf diesem Gebiete geübter Ingenieure angewiesen, aber selbst dabei kam es häufig zu ganz unnützen Arbeiten, indem man manchmal *grössere Bauten als notwendig*, andermal *Kleinere* errichtet hat, ohne einen Beharrungszustand erzielen zu können.

Im Rahmen dieses Aufsatzes gibt der Verfasser für die Bestimmung der *erforderlichen Tiefe der Schlitzte und ihre Linienführung betreffend ein zielsicheres Planungsverfahren*, das er bereits in mehreren Fällen bei ungarischen Bauausführungen der behandelten Art mit vollem Erfolg angewendet hat.

Die bodenkundliche Untersuchung besteht aus *zwei* Teilen. Zunächst werden an zweckmässig und in angemessener Dichte gewählten Stellen Bohrungen angestellt und *Bodenproben* genommen, deren *natürlicher Wassergehalt* (w) unmittelbar nach ihrer Gewinnung festzustellen ist. Als zweiter Teil der Untersuchung werden jene *Konsistenzgrenzen* der aus den Bohrlöchern gewonnenen Bodenarten bestimmt, bei welchen die Möglichkeit einer Rutschung und Bewegung besonders vorliegt; es werden daher bestimmt die *Fliessgrenze* (F) sowie die *Ausrollgrenze* (P). Die Fliessgrenze bedeutet *jenes Mass an Wassergehalt*, bei welchem die Kohäsion des Bodens (Druckfestigkeit) *fast Null* beträgt, Rollgrenze bezeichnet jenen *geringen Wassergehalt*, bei welchem der Boden seine Bewegungsfähigkeit verliert und *spröde, brüchige* Eigenart annimmt. Es liegt an der Hand, dass *die Scherfestigkeit eines Bodens umso kleiner ist, je näher sein Wassergehalt der Fliessgrenze liegt*. Die Figuren 1 a, 1 b in der Tafel I zeigen die *Konsistenzkurven* und die *natürlichen Wassergehaltskurven* der aus den Bohrlöchern XII und XIV zutage gefördertten Bodenschichten.

Rutschungsgefahr droht in jenen Punkten, in denen die Wassergehaltskurve (gestrichelte Linie) *der Fliessgrenze am nächsten liegt*, wo demnach der Ausdruck:

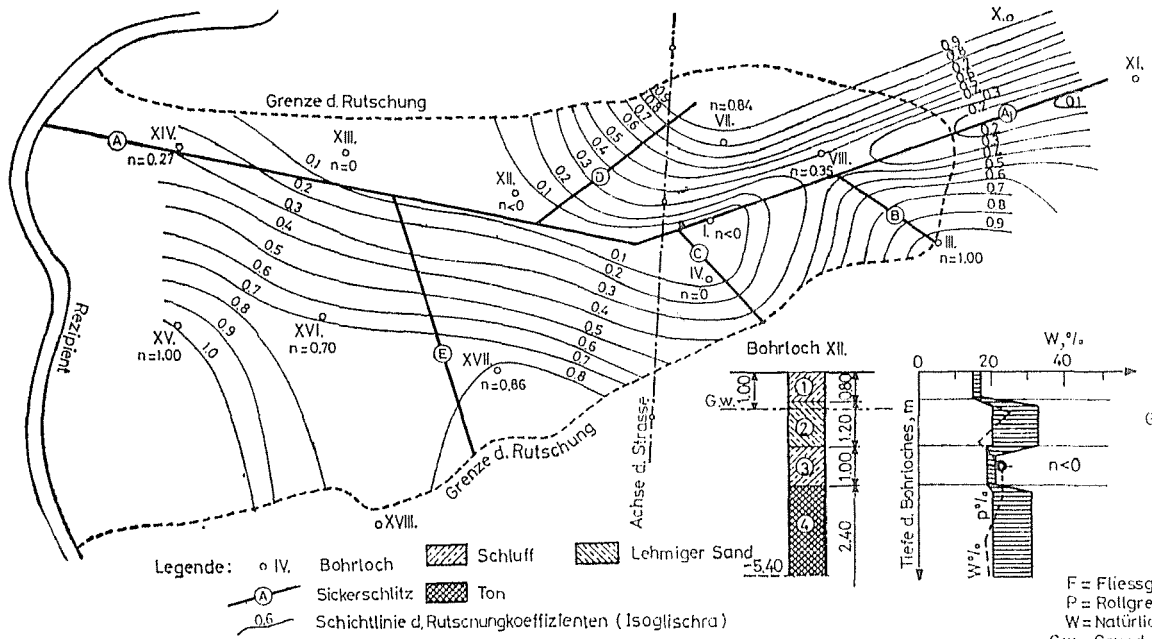
$$n = \frac{F - W}{F - P} \quad (1)$$

der *Rutschungsbeiwert* genannt werden kann, den *kleinsten* Wert repräsentiert. Dieser Fall liegt bei der Bohrung XIV in 3.0 m Tiefe vor, wo $n = 0.27$ beträgt, bei der Bohrung XII hingegen in 2.5 m Tiefe wo $n < 0$ ist, *der Wassergehalt demnach die Fliessgrenze überschreitet*, die Scherfestigkeit des Bodens beträgt daher der Rutschung gegenüber 0. Die in den Figuren 1 a und 1 b mit doppeltem Nullkreis bezeichneten Punkte geben die *wahrscheinliche Tiefenlage der Gleitfläche* an, da an diesen Stellen *die Abscherung des Erdreiches der geringsten Kraft bedarf*.

Vorige Annahme lässt sich auf bodenmechanischer Grundlage folgend beweisen.

Nachdem die Scherfestigkeit im Sinne des *Coulombschen Satzes* mit der Druckfestigkeit in einfacher *linearer* Beziehung steht, lässt sich die Kohäsion

Taf. 1.

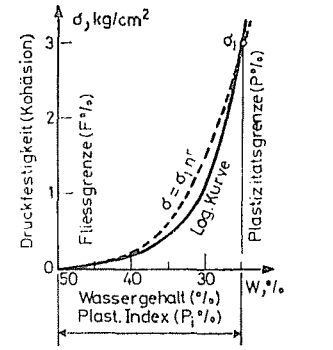


Legende: ○ IV, Bohrloch
 (A) Sickerschlitze
 0.5 Schichtlinie d. Rutschungskoeffizienten (Isoglischa)
 Schluff
 Ton
 Lehmirger Sand

Abb. 1a.

Trassierung d. Sickerschlitze

Abb. 2.



F = Fließgrenze
 P = Rottgrenze
 W = Natürlicher Wassergehalt
 Gw = Grundwasserstand

Abb. 1b.

des Bodens auch aus seiner *Druckfestigkeit* berechnen. Die *Druckfestigkeit* (σ_d) ändert sich *logarithmisch* mit dem Wassergehalt (A. CASAGRANDE: Research on the Atterberg Limits of Soils. Public Roads. Vol. 13, n^o 8), doch kann diese Gesetzmässigkeit auch durch eine *Potenzparabel* mit guter Annäherung ausgedrückt werden (siehe Fig. 2) sodass

$$\sigma_d = \sigma_1 \left(\frac{F - W}{F - P} \right)^r = \sigma_1 n^r \quad (2)$$

wo σ_1 die *an der Rollgrenze liegende hohe Druckfestigkeit* des Bodens bedeutet.

Wie aus Formel (2) klar hervorgeht, ist für die *Druckfestigkeit* bzw. *Scherfestigkeit des Bodens*, d. h. für seine *Kohäsion der Rutschungsbeiwert n* am meisten ausschlaggebend, da er im Ausdruck der mit dem Wassergehalt wechselnden *Kohäsion auf höherer Potenz* (r) vorkommt.

Wenn für jedes der im Rutschungsgelände planmässig verteilten Bohrlöcher das *Kleinste* des Rutschungsbeiwertes d. h. der gefährlichste Wert ermittelt wird und dieser Wert als Höhenpunkt neben das betreffende Bohrloch eingetragen wird, so lässt sich durch Interpolation eine *schichtenplanartige* Zeichnung herstellen, die ein leicht übersichtliches Bild über die *Kohäsionsverteilung* im ganzen Rutschungskörper gibt. Die in der Fig. 3 der Tafel dargestellten Kurven (*Isoglichra*) zeigen das *Mass der Rutschungsgefahr* und annähernd die *Kohäsion längs der Kurven*.

Die *Scheitelpunkte* und *Gratlinien* dieses durch die Kurven gebildeten topographischen Bildes bedeuten jene Teile der Erdmassen, in denen *höhere Kohäsion*, d. h. stabiler Zustand herrscht, die Täler und tiefere Punkte bedeuten Stellen mit *geringer Kohäsion*, d. h. *zum Rutschen neigende labile Stellen*.

Zusammenfassung

Die *Hauptsickerschlütze* sind in den Hauptmulden, die *Nebenschlütze* in den Nebenmulden bzw. in der Fallrichtung der Hügel anzuordnen, um *wirksame* und *rasche* Austrocknung herbeizuführen.

Die Linie A_1 und A_2 in Fig. 3 bedeuten *Hauptsickerschlütze*, die Linien $B-E$ *Nebenschlütze*, übrigens zeigt dieses Bild die *Entwässerungsanlagen* eines 20 000 m² umfassenden Rutschgebietes an einer ungarischen Bergstrasse.

Bestimmung der Senkung von Bauwerken

Das *Anschliessen im Niveau* von fugenlosen Strassendecken an die Widerlager von Bauwerken erfordert die Kenntnis des Höchstaumasses der zu erwartenden Senkung der Widerlager und Flügelmauern. Die Berechnung

dieser Senkung wird heute bei den neuzeitlichen Strassenbauten allgemein vorgenommen, seit die *Zusammendrückbarkeit* des Bodens mit Hilfe des *Terzaghischen Ödometers* im Wege eines einfachen Versuches bestimmt werden kann.

Der Ödometer-Versuch gibt aber nur über *eine physikalische Charakteristik* des Untergrundes Aufschluss. Die *Berechnung*, durch die sich die Senkung ermitteln lässt, kann nach sehr *verschiedenen Methoden* erfolgen, da sie auf der Kenntnis des im Untergrunde herrschenden Spannungszustandes beruht, welcher Letzterer wieder nach aus verschiedenen Hypothesen abgeleiteten Theorien berechnet werden kann (Boussinesq, Michell, Fröhlich und Andere).

Im Nachstehenden behandelt der Verfasser *eine Berechnungsmethode*, die er bei Bauwerksgründungen bei ungarischen Strassenbauten schon seit Jahren anwendet.

Diese Berechnungsmethode zeichnet sich besonders durch den Vorzug aus, dass sie *die durch das Eigengewicht des Bodens hervorgerufenen Spannungen* und sohin auch die schon früher vollzogenen Setzungen erfasst, folglich *den wirklich vorhandenen Verhältnissen weit näherliegende Resultate* liefert, als jene Berechnungsmethoden, die nur die vom Bauwerk herrührende Nutzbelastung berücksichtigen.

Der Verfasser hält sich die Spannungsverteilung im Untergrunde betreffend an die *Michellsche Theorie*, die unter der Fundamentmauer nach beiden Haupttrichtungen *gleichmässig verteilte Druckspannung* q_0 annimmt. Die durch eine Nutzbelastung q_0 im beliebigen Punkt Z hervorgerufene Druckspannung beträgt:

$$\sigma_z = \frac{q_0}{\pi} [\sin(\beta_2 - \beta_1) \cos(\beta_2 + \beta_1) + (\beta_2 - \beta_1)]. \quad (1)$$

Die Bedeutung der in der Formel enthaltenen Winkel β_2 und β_1 erhellt aus Fig. 1.

Die Spannungsverteilung in irgend einer *waagerechten Ebene* ist durch eine *glockenförmige Linie* gegeben, deren Grösstordinate an der lotrechten Symmetrieachse liegt, wo auch *die Setzung ihr Höchstmass* erreicht. Hier gilt:

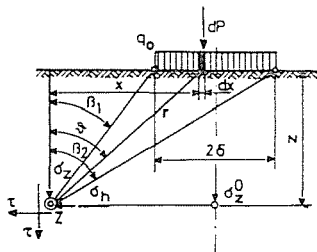


Fig. 1. Spannungsberechnung nach Michell

$\beta_2 = -\beta_1 = \beta_0$, woraus die in der Symmetrie-Ebene auftretende grösste Druckspannung:

$$\sigma_{z_0} = \frac{q_0}{\pi} [\sin 2\beta_0 + 2\beta_0] \quad (2)$$

wo

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{b}{z}. \quad (3)$$

Wenn wir aus den Beziehungen unter (2) und (3) mit Hilfe des einer beliebigen Tiefe z entsprechenden Winkels β_0 die Spannung σ_z ermitteln und diese in der Tiefe z als Abszisse auftragen, so gelangen wir zu der in Fig. 2 ersichtlichen σ_z -Linie. Die der Form einer halben Glocke folgende Linie nähert sich in der dreifachen Gründungsbreite ($2b$) entsprechenden Tiefe zu einem Grenzwert so, dass wenn $z \cong 3(2b)$ ist, so ist $\sigma_z \cong 0,2 q_0$, d. h. die durch die Nutzlast erzeugte Druckspannung σ_z sinkt in der, der dreifachen Gründungsbreite ($2b$) entsprechenden Tiefe auf $1/5$ ihres ursprünglichen Wertes (q_0). Dergleiche geringe Spannungen haben nur mehr unbedeutende Setzungen zur Folge, haben daher auf das Ausmass der Senkung keinen wesentlichen Einfluss.

Diese Tatsache hat in der Praxis die Regel entstehen lassen, den Untergrund unter der Gründungssohle in ungefähr der dreifachen Fundamentbreite gleichen Tiefe zu untersuchen, z. B. durch Bohren. Aus allen der verschiedenartigen und in verschiedenem Zustande befindlichen Bodenschichte müssen Proben — *in situ* — gezogen werden (z. B. mittels Casagrandeschem Bohrerkopf).

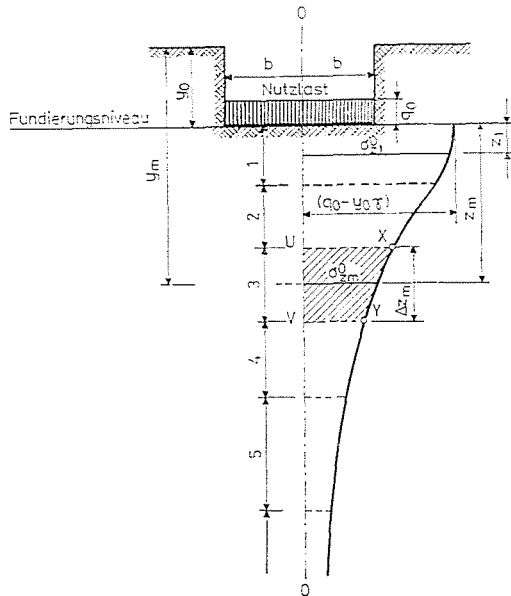


Fig. 2. Spannungsverteilung in der Mitte der Sohle

Tonböden sind besonders auf ihren *Wassergehalt* zu untersuchen. Der *Ödometer-versuch* ist für jede verschiedenartige Bodenschicht vorzunehmen. Wenn der Untergrund bis zu einer beträchtlichen Tiefe *ziemlich homogene Beschaffenheit* besitzt, so wird es genügen, die Probe *nur aus der obersten Schicht in situ zu nehmen* und den Kompressionsversuch mit Hilfe des *Casagrandeschen Ödometers* auszuführen.

Nehmen wir nun an, dass die *Zusammendrückungskurve* gemäss Fig. 3 verläuft, deren Ordinaten die *spezifische Zusammendrückbarkeit* ($\varepsilon\%$) bei der

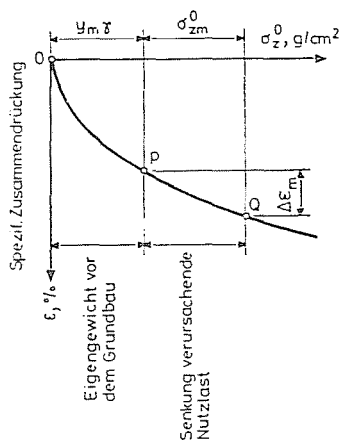


Fig. 3. Zusammendrückungskurve

dazugehörigen Druckspannung σ_{z_0} angeben. Die Berechnung wird jetzt folgend angestellt. Die Kurve (σ_{z_0}) nach Fig. 2 wird in Anbetracht des geschichteten Aufbaues des Untergrundes durch Lamellenschnitte so aufgeteilt, dass die in die einzelnen Lamellen fallenden Teile der Kurve (XY) durch Gerade ersetzt werden können. Die Kompression der auf diese Weise erhaltenen UV Lamelle ergibt sich als Produkt aus der Schichthöhe Δz_m bzw. aus der zu $\sigma_{z_m}^0$ gehörigen spezifischen $\Delta \varepsilon_m$, d. h. die infolge Zusammendrückung der Schicht UV eintretende Setzung beträgt $\eta_m = \Delta z_m \times \Delta \varepsilon_m$, woraus die Gesamtsetzung:

$$\eta = \sum_1^n \Delta z_m \Delta \varepsilon_m. \quad (4)$$

Der zu $\sigma_{z_m}^0$ gehörige Wert von $\Delta \varepsilon_m$ wird folgend ermittelt. Die Schicht UV ist schon vor Aufbringen der Nutzbelastung q_0 unter der Druckspannung infolge des Eigengewichtes d. h. des Gewichtes der überlagernden Bodenmasse gestanden. Diese Druckspannung ist das Produkt der Tiefe und des Raumgewichtes, d. h. die durch das Eigengewicht erzeugte Spannung beträgt $y_m \gamma$. Diese Druckspannung hat ihre Kompressionswirkung schon lange vor dem Aufbringen der Nutzbelastung ausgeübt, sodass die spezifische Zusammendrückung nur vom Punkt P der Zusammendrückungskurve gemessen werden kann. (Siehe Fig. 3).

Die Zusammendrückung wird lediglich durch *den Gewichtsunterschied zwischen Nutzlast und der ausgehobenen Bodenmasse von y_0 Mächtigkeit ($q_0 - y_0 \gamma$) bewirkt*. Wenn diese Spannung als äussere Belastung aufgefasst wird, so kann im Sinne voriger Ausführungen die σ_{z_m} -Linie konstruiert werden. Nach Auftragung von $\sigma_{z_m}^0$ in Fig. 3 erhält man den Punkt Q und die Ordinatendifferenz $PQ = \Delta \varepsilon_m$ ergibt die *spezifische Zusammendrückbarkeit* ($\Delta \varepsilon_m$).

Der Rechnungsvorgang ist in nachstehender Zusammenstellung gegeben. Es sei: Gründungsbreite $2b = 4.00$ m, Fundierungstiefe $y_0 = 3.60$ m, Nutzbelastung $q_0 = 2.20$ kg/cm², und Raumgewicht des Untergrundes $\gamma = 2 \cdot 2$ t/m³ (dichter Lehm). Hieraus beträgt die in der Gründungsebene wirkende Druckspannung:

$$\sigma'_{z_0} = q_0 - y_0 \cdot \gamma = 2.20 - 0.79 = 1.41 \text{ kg/cm}^2.$$

Tafel I

Senkungsberechnung

Lamellen Nr.	Schichthöhe Δz_m	Bodengewicht vor dem Aushub γm^2	Senkung verursachender Spannung σ_{z_m}	Spezifische Zusammendrückbarkeit $\Delta \varepsilon_m$	Δh
	m	kg/cm ²	kg/cm ²	%	cm
I.	2.00	$4.6 \times 2.2 = 1.01$	1.35	1.05	2.10
II.	2.00	$6.6 \times 2.2 = 1.45$	0.93	0.65	1.30
III.	2.00	$8.6 \times 2.2 = 1.89$	0.62	0.40	0.80
IV.	2.00	$10.6 \times 2.2 = 2.33$	0.51	0.32	0.64
V.	2.00	$12.6 \times 2.2 = 2.77$	0.38	0.25	0.50

Gesamtsetzung: $\eta = \Sigma \Delta h = 5.34$ cm

Die geschilderte zeichnerische und rechnerische Methode gilt als *Näherungsverfahren*, weil die Zusammendrückungs- und Expansionskurven des Bodens auf der Strecke PQ als gleich angenommen werden, obwohl in der Wirklichkeit die Kurven der bei der Probeentnahme eintretenden *Ausdehnung* und der im Ödometer entstehenden *neuerlichen Zusammendrückung* nicht zusammenfallen.

Vom praktischen Standpunkte hat aber *dieser Unterschied* auf die *Größenordnung* der Senkung keine Bedeutung.

Zusammenfassung

József Jáky widmete sein ganzes Leben der Wissenschaft der Bodenmechanik, und ihrer Unterricht. Er behauptete, daß sich die Bodeneigenschaften ebenso versuchsmäßig untersuchen lassen, wie die Materialeigenschaften, und gründete dazu eines der ersten bodenmechanischen Laboratorien in Europa. Ihm ist der Gedanke der kreiszylindrischen Gleitfläche in der Erddrucktheorie zu verdanken. Auch seine straßen- und eisenbahnbautechnischen Arbeiten sind maßgebend.