Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 79 (1961)
Heft: 31

Artikel: Praktische Anwendung der Verdichtungskontrolle nach J. Hilf
Autor: Scherrer, Hans U.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-65580

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

punkte des Technikers aus gibt. Auch viele weitere interessante Mitteilungen verdienen unsere Aufmerksamkeit; so anerkennt der STV zwölf schweizerische Technikumsschulen, obwohl unbestritten ist, dass diese Schulen auf sehr verschiedener Höhe stehen. Zu den anerkannten gehören auch die Abendtechniken von Zürich, St. Gallen und Luzern.

Am 3. Juni d. J. hat der STV in Genf seine 24. Generalversammlung durchgeführt. Unter der sicheren und gütigen Leitung von Präsident *Adolf Gass,* Bau-Ing., Basel, wickelten sich die Geschäfte flüssig ab. In seiner Ansprache setzte er sich unter dem Motto «Freie Bahn dem Tüchtigen» mit Wärme für das Schweiz. Register der Ingenieure, der Architekten und der Techniker ein. Nach 16jähriger Tätigkeit im Zentralvorstand des STV (davon sechs Jahre als Präsident) wurde er zum Ehrenmitglied gewählt. Die gleiche Ehrung erfuhren die zwei andern zurücktretenden Zentralvorstandsmitglieder *R. Renaud,* La Chaux-de-Fonds, und *G. Troller,* Rorschach, sowie *J. Trüb,* Windisch, für seine Verdienste um die Krankenkasse STV, und Prof. *A. Imhof,* Zürich, als langjähriger Chefredaktor der STZ (auf das Fest hin hat er ein reichhaltiges Sonderheft, Nr. 21/22, geschaffen). Neu in den Zentralvorstand wurden gewählt *H. Drexel,* Betriebsleiter, St. Gallen, *H. Mühlethaler,* Prokurist CKW, Luzern, und *F. Dournow,* Betriebsleiter, Genf, während Masch.-Ing. *Hermann Aeppli* (bei Gebr. Sulzer, Winterthur) zum Präsidenten des STV gewählt wurde.

Eingerahmt waren die geschäftlichen Sitzungen von einem Vormittags-Empfang durch die Genfer Regierung im Hotel Métropole und einem Bankett mit Unterhaltungsabend im Palais des Expositions, an welchem gegen 450 Personen teilnahmen, während am Sonntag, 4. Juni, das CERN und am Montag verschiedene andere Sehenswürdigkeiten besucht wurden. Gerne und mit Gewinn haben wir an dieser Generalversammlung des STV teilgenommen, welche die guten Beziehungen zwischen STV, S. I. A. und G. E. P. erneut gefestigt hat. *W. J.*

Praktische Anwendung der Verdichtungskontrolle nach J. Hilf

DK 624.135.001.4

Von **Hans U. Scherrer,** dipl. Bau-Ing. ETH, Rio de Janeiro

Zusammenfassung

Mit der zunehmenden Bedeutung der Erdschüttungen nimmt auch jene der raschen Verdichtungskontrolle zu. In den vorliegenden Ausführungen wird die Methode nach J. Hilf dargelegt, welche in 30 bis 60 Minuten Resultate in genügender Genauigkeit liefert. Es werden danach weitere Vorzüge dieser Methode beleuchtet und verschiedene Aspekte der praktischen Anwendung behandelt. Insbesondere wird das Verfahren zur Umgehung des Antrocknens der Proben vorgelegt.

I. Einleitung

In letzter Zeit haben Staudämme aus geschütteten und eingewalzten Erd- und Steinmaterialien immer mehr an Bedeutung gewonnen. Dies gilt insbesondere auch für junge überseeische Länder von gewaltiger Ausdehnung — wie z. B. Brasilien — wo die Distanzen und die Unwegsamkeit für den Materialtransport (Zement) gewichtige Faktoren zu Ungunsten von Betonsperren bilden. In tropischen Ländern kommt dazu, dass die Verwitterungszone meistens sehr mächtig ist, und somit der für eine Betonsperre erforderliche, tragfähige Fels oft nur in unwirtschaftlicher Tiefe vorgefunden wird. Dementsprechend sind auch in letzter Zeit die für die Voruntersuchungen im Feld und Laboratorium, für Berechnung, Entwurf und Ausführungskontrolle bestehenden Methoden verbessert und neue Verfahren entwickelt worden.

Abgesehen vom Sättigungsgrad und vom Porenwasserdruck hängen die für den Entwurf eines Erddammes erforderlichen Materialcharakteristiken wie Raumgewicht, Durchlässigkeit, Setzungskennziffern und Scherfestigkeit bei einem gegebenen Material hauptsächlich von der Lagerungsdichte und vom Einbauwassergehalt ab. So beschränkt sich die Ausführungskontrolle bezüglich Materialeigenschaften in der Hauptsache auf die periodische Bestimmung der Lagerungsdichte und des Einbauwassergehaltes der eingewalzten Erde. Es sei hier nur am Rande vermerkt, wie wichtig natürlich die kontinuierliche visuelle Identifikation des anfallenden Materials ist.

Die Lagerungsdichte wird für praktische Bedürfnisse hinsichtlich Verdichtungskontrolle in Raumgewicht, und zwar, um weitere Veränderliche wie Wassergehalt auszuschliessen, in Trockenraumgewicht ausgedrückt. Das spezifische Gewicht der Festsubstanz als weitere Variable ist von untergeordneter Bedeutung. Einbauwassergehalt wie auch Trockenraumgewicht der Schüttung werden mit dem am gleichen Material durch einen standardisierten Verdichtungsversuch vorgängig festgestellten optimalen Wassergehalt bzw. maximalen Trockenraumgewicht in Beziehung gebracht. Was also die Verdichtungskontrolle im besonderen interessiert, ist der Verdichtungsgrad D, definiert als Verhältnis des verdichteten Feldtrockenraumgewichts zum maximalen Versuchs-Trockenraumgewicht, und ferner die Differenz zwischen Einbau- und optimalem Wassergehalt.

Die heute üblichsten Verdichtungs-Bezugsversuche sind der Proctor Standard- und der Proctor Modified-Versuch, welche sich lediglich in der aufgebrachten Verdichtungsenergie pro Volumeneinheit unterscheiden. Der dem Proctor Standard-Versuch entsprechende Verdichtungsgrad ist mit den heute verfügbaren Verdichtungsmaschinen ökonomisch vertretbar und genügt in den meisten Fällen des Dammbaues auch den technischen Anforderungen.

Ein grosses Hindernis bei der praktischen Verdichtungskontrolle ist die Notwendigkeit des Trocknens des Materials im Ofen, welches bei Lehm bis zu 24 Stunden fordern kann. Dies stellt eine zeitraubende Operation dar, welche zur Bestimmung des Trockenraumgewichtes und des Wassergehaltes unumgänglich ist. Bei der immer steigenden Kapazität der Erdbewegungsmaschinen ist es aber von grosser ökonomischer Bedeutung, die Kontrollresultate derart zu erzielen, dass der Schütt- und Kompaktierungsrhythmus nicht beeinträchtigt wird. So sind denn eine Reihe von indirekten (Proctor Nadel-Penetration) und direkten (Kalzium-Karbid-Methode, Ofentrocknen unter Vakuum u. a. m.) Methoden entwickelt worden, um das zeitraubende Ofentrocknen zu umgehen oder abzukürzen. Diese lassen aber noch immer zu wünschen übrig, sei es an der Dauer des Versuches oder dann an der Genauigkeit.

Die von *Jack W. Hilf* an der «Conference on Soils for Engineering Purposes» (Mexico, Dezember 1957) [1] [1]), dargelegte, rasche Kontrollmethode bestimmt direkt den Verdichtungsgrad D und die Differenz der Wassergehalte ohne Ofentrocknen des Materials und genügt für praktische Bedürfnisse den Zeit- und Genauigkeitsanforderungen.

II. Die Verdichtungskontrolle nach J. Hilf

Wie einleitend erwähnt, bildet das Austrocknen der Proben bei der Verdichtungskontrolle ein Hindernis, welches sogar den Ablauf einer Schüttungs- und Kompaktierungsarbeit beeinträchtigen kann. Die Methode nach Hilf arbeitet nur mit Feuchtgewichten und beschränkt sich darauf, direkt den Verdichtungsgrad D, definitionsgemäss das Verhältnis des Feldtrockenraumgewichtes zum maximalen Trockenraumgewicht (nach Proctor) und direkt die Differenz zwischen dem Einbauwassergehalt und dem optimalen Wassergehalt zu bestimmen. Sie verzichtet also im Augenblick der Kontrolle auf die Kenntnis der absoluten Werte des Wassergehaltes und des Trockenraumgewichtes. Diese werden nachträglich zwar bestimmt und errechnet, dienen aber nur zur Vervollständigung der Daten.

Das Feuchtraumgewicht einer Probe aus einer Schüttung kann leicht bestimmt werden und immer in Trockenraum-

[1]) [ ] beziehen sich auf Literatur-Verzeichnis im Anhang.

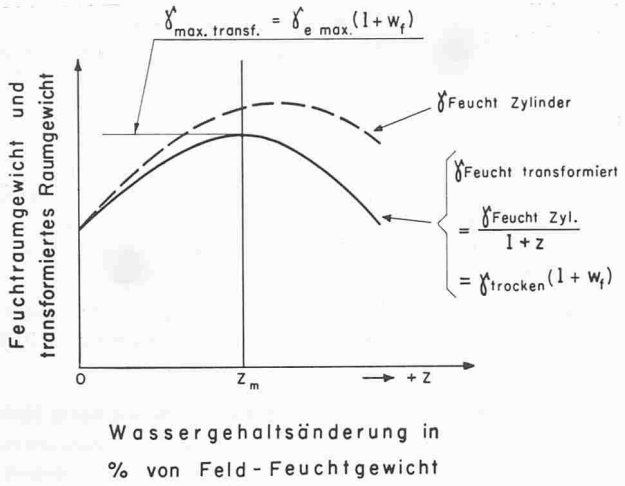

Bild 1. Variation des Feuchtraumgewichtes und des transformierten Raumgewichtes infolge Wassergehaltsänderung

gewicht und Wassergehalt ausgedrückt werden, nämlich:

(1) $\gamma_f = \gamma_{tr}\ (1 + w_f)$

Wird zu dieser Probe sukzessiv Wasser zugefügt und jedesmal die Probe im Proctor-Zylinder verdichtet, so ergibt sich eine Beziehung, welche in Bild 1 durch die gestrichelte Kurve dargestellt ist. Auf der Abszisse wird die Wassergehaltsänderung z in % des Feldfeuchtgewichtes aufgetragen. Diese Wassergehaltsänderung z kann mathematisch auch durch die konventionellen (Trockengewicht als Bezugsgewicht) Wassergehalte w und w_f wie folgt ausgedrückt werden:

(2) $z = \dfrac{w - w_f}{1 + w_f}$

Die auf der Ordinate aufgetragenen Zylinder-Feuchtraumgewichte können in analoger Weise zu Gleichung (1) immer durch das Produkt von Trockenraumgewicht γ_e und zugehörigem $(1 + w)$ aufgefasst werden, wobei beide Faktoren Veränderliche sind. Das Trockenraumgewicht hängt bekanntlich vom Einbauwassergehalt ab.

Werden die Ordinatenwerte der gestrichelten Kurve, d. h. die Feuchtraumgewichte durch den Ausdruck $(1 + z)$ dividiert, so ergibt sich mathematisch:

(3) $\dfrac{\gamma_{Feucht\ Zylinder}}{1 + z} = \dfrac{\gamma_e\,(1 + w)}{1 + \dfrac{w - w_f}{1 + w_f}} = \gamma_e\,(1 + w_f)$

Da der Ausdruck $(1 + w_f)$ für eine bestimmte Probe von der Schüttung mit gegebenem Feldwassergehalt w_f eine Konstante ist, folgt, dass das Trockenraumgewicht im Sinne der Proctor-Kurve in Abhängigkeit vom Wassergehalt variiert. Die ausgezogene «transformierte Raumgewichts-Kurve», Bild 1, entspricht einer normalen Proctor-Kurve, deren Ordinatenwerte mit $(1 + w_f)$ multipliziert sind und deren Abszissenwerte Wassergehaltsänderungen in bezug auf ein bestimmtes Feldfeuchtgewicht (statt Trockengewicht) darstellen.

Insbesondere entspricht der Höchstwert bei der Abszisse z_m dem maximalen Trockenraumgewicht nach Proctor multipliziert mit dem Ausdruck $(1 + w_f)$:

(4) $\gamma_{max\ trans} = \gamma_{e\ max}\ (1 + w_f)$

Demzufolge ergibt sich für den Verdichtungsgrad D, nämlich das Verhältnis von Feldtrockenraumgewicht zu maximalem Proctor-Trockenraumgewicht:

(5) $\dfrac{\gamma_{tr}}{\gamma_{e\,max}} = \dfrac{\gamma_{tr}\ (1 + w_f)}{\gamma_{e\,max}\,(1 + w_f)} = \dfrac{\text{Feldfeuchtraumgew.}}{\text{max. transf. Raumgew.}} = D$

Der Ordinatenwert bei $z = 0$ entspricht jenem Feuchtraumgewicht, welches man im Proctor-Zylinder unter Beibehaltung des Feldwassergehaltes erhält. Das transformierte Raumgewicht ist diesem identisch, weil z gleich Null ist.

Der Quotient C wird definiert als:

(6) $C = \dfrac{\text{Feldfeuchtraumgew.}}{\text{Zyl.-Feuchtraumgew.}} = \dfrac{\gamma_{tr}\,(1 + w_f)}{\gamma_e\,(1 + w_f)} = \dfrac{\gamma_{tr}}{\gamma_e}$

Dieser «Energie-Quotient» C gibt ein Mass über die im Feld aufgebrachte Verdichtungsenergie verglichen — unter Beibehaltung des Wassergehaltes — mit jener des Proctor Standards.

Was aber für die Kontrolle weiterhin interessiert, ist die Differenz zwischen Feldwassergehalt und optimalem Wassergehalt. Die Abszisse z_m (Bild 1) ist dem maximalen Trokkenraumgewicht $\gamma_{e\,max}$ (Proctor) zugeordnet und entspricht demzufolge dem optimalen Wassergehalt w_o. Nach Gleichung (2) lässt sich schreiben:

(7) $w_o - w_f = z_m\ (1 + w_f)$

Um diese Differenz in optimalem Wassergehalt auszudrücken, schreibt sich nach Gleichung (3):

(8) $(1 + w_f) = \dfrac{1 + w}{1 + z} = \dfrac{1 + w_o}{1 + z_m}$

oder also:

(9) $w_o - w_f = z_m\,\dfrac{1 + w_o}{1 + z_m}$

Beide zur Verfügung stehenden Beziehungen für die Wassergehaltsdifferenz hängen von einer Schätzung entweder des Feldwassergehaltes (7) oder des optimalen Wassergehaltes (9) ab. Es lässt sich dagegen leicht zeigen, dass selbst ein grober Fehler, beispielsweise des geschätzten optimalen Wassergehaltes, einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Wassergehaltsdifferenz ausübt.

Für praktische Bedürfnisse genügt eine Schätzung an Hand der maximalen Raumgewichte mittels einer Beziehung wie sie Bild 2 zeigt, welche einer Arbeit von *Kuczinski* [4] entstammt. Diese statistische Korrelation beruht auf über 1000 Versuchsresultaten an Proben aus ganz Brasilien. Der angegebene Bereich gibt ein Mass über die Streuung, wobei etwa 90 % der Resultate innerhalb der Begrenzung fallen. Zum Vergleich ist als gestrichelte Kurve in Bild 2 auch die von J. Hilf [2] auf Grund von 1300 Proben angeführte Korrelation des U. S. Bureau of Reclamation eingezeichnet.

Für die rasche Verdichtungskontrolle nach J. Hilf braucht es also folgende Elemente:

1. Feldfeuchtraumgewicht nach einer der üblichen Methoden (Probenentnahme).

2. Verdichtung des Materials bei gleichem (Feld-)Wassergehalt nach Proctor Standard. Auftragen dieses Feuchtraumgewichtes auf der $z = 0$-Ordinate.

3. Zufügen einer bestimmten Wassermenge z_i in % vom Feldfeuchtgewicht. Durchmischen und Verdichten des Ma-

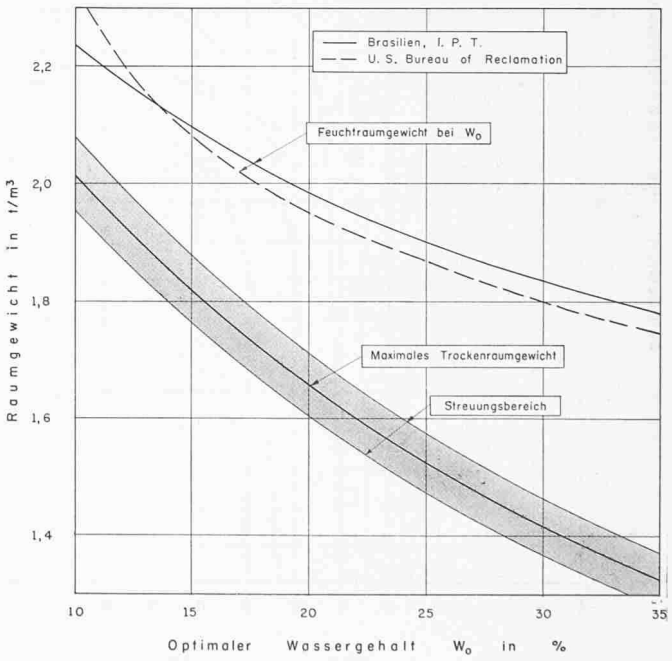

Bild 2. Korrelation zwischen optimalem Wassergehalt und maximalem Feuchtraumgewicht. Quellen: Literaturverzeichnis [2] und [4]

terials nach Proctor Standard. Feuchtraumgewicht durch $(1 + z_i)$ dividieren. Auftragen des damit erhaltenen transformierten Raumgewichtes auf der z_i-Ordinate.

4. Wiederholen von 3, mit neuer bestimmter Wasserzunahme (oder -abnahme durch Antrocknen der Probe).

4b. Eventuell nochmalige Wiederholung von 3. mit wieder neuer Wasserzunahme, bis genügend Punkte für 5 verfügbar sind.

5. Aufzeichnen der transformierten Raumgewichtskurve [2]) und Bestimmung des max. transformierten Raumgewichtes und der zugehörigen Wasserzunahme z_m in % des Feldfeuchtgewichtes.

6. Ermittlung von:

$$\text{Verdichtungsgrad } D = \frac{\text{Feld-Feuchtraumgewicht}}{\text{max. transform. Raumgewicht}}$$

[2]) Kurve ist angenähert eine Parabel. Zur Ermittlung des Scheitelpunktes aus drei Parabelpunkten siehe Anhang.

$$\text{Energiequotient } C = \frac{\text{Feld-Feuchtraumgewicht}}{\text{Zyl. Feuchtraumgewicht von Punkt 2}}$$

$$\text{Wassergehaltsdifferenz } w_o - w_f = z_m \frac{1 + w_o}{1 + z_m}$$

Zur nachträglichen Vervollständigung der Daten wird der Feldwassergehalt konventionell bestimmt, womit dann die absoluten Werte des Feldtrockenraumgewichtes, des max. Trockenraumgewichtes nach Proctor und des optimalen Wassergehaltes dieser Probe berechnet werden können.

Als graphisches Beispiel mit numerischen Werten dient Bild 7, wobei sich die Kreisnummern auf die obigen Schritte beziehen.

III. Graphische Auswertung des Kontrollversuches nach Hilf

Zur Erleichterung der Auswertung des Kontrollversuches können die Eintragungen graphisch auf einem zu diesem

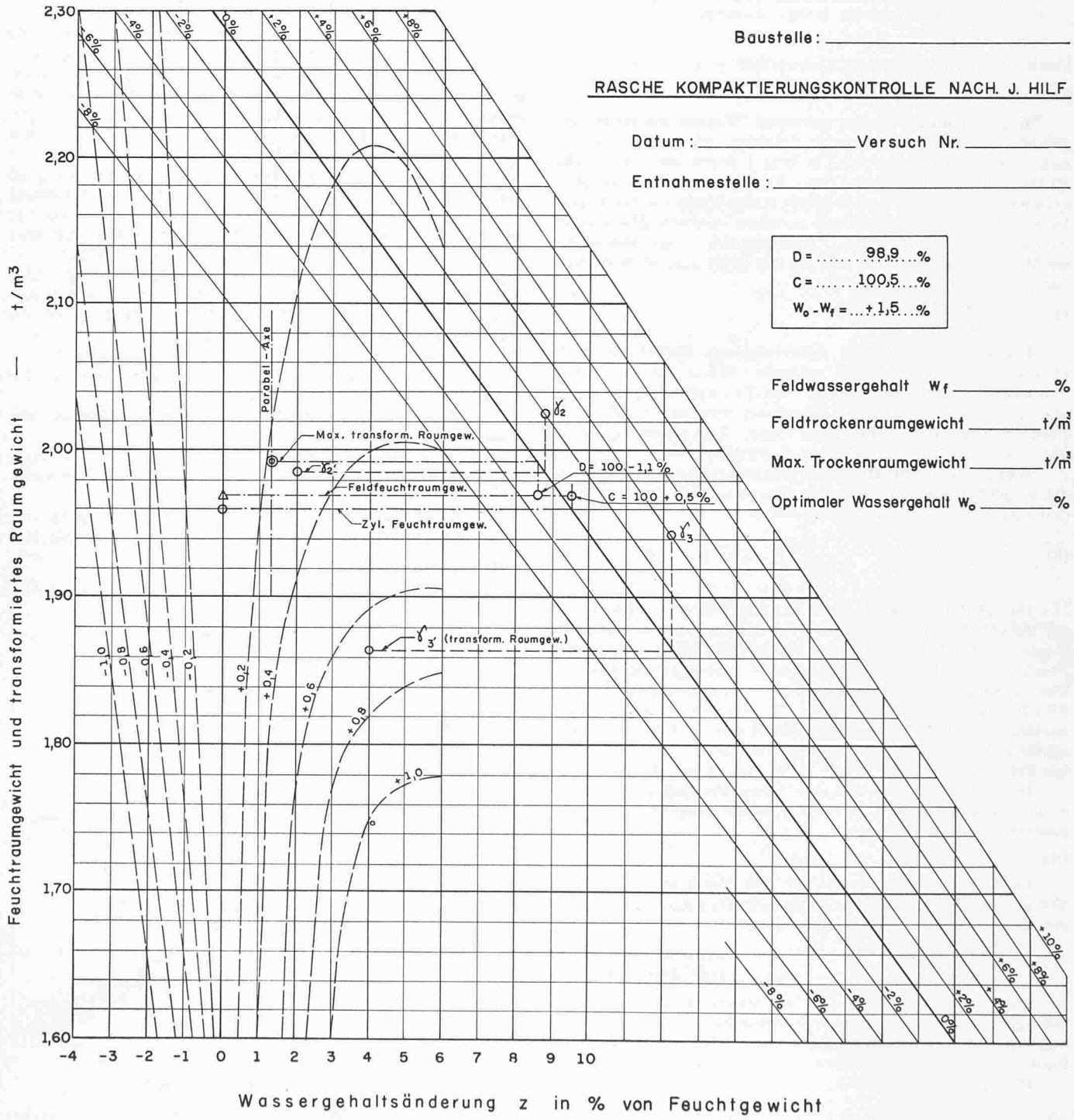

Bild 3. Formular zur graphischen Auswertung des Kontrollversuches, mit numerischem Beispiel

Zweck vorbereiteten Formular durchgeführt werden. Dazu dient die Darstellung von Bild 3.

Da das Zylinderfeuchtraumgewicht bei gleichbleibendem Feldwassergehalt identisch ist mit dem zugehörigen transformierten Raumgewicht, wird dieses direkt auf der $z = 0$-Ordinate aufgetragen.

Es erweist sich praktisch, die Wassergehaltszunahme z um ganze Prozentzahlen und um gleiche Intervalle zu bewerkstelligen, z. B. 2 %, 4 %. Die Zylinder-Feuchtraumgewichte werden auf den Diagonalen ihrer zugehörigen z-Prozentsätze aufgetragen. Der Schnittpunkt der Vertikalen durch diese Punkte mit der Null-Diagonale ergibt das transformierte Raumgewicht; diese Operation entspricht der Division durch den Ausdruck $(1 + z)$. Diese transformierten Raumgewichte werden horizontal auf die entsprechenden z-Ordinaten übertragen.

In dem in Bild 3 eingezeichneten Beispiel ergab die Verdichtung nach Zugabe von 2 % ein Feuchtraumgewicht γ_2 von 2,025 t/m³ (siehe Diagonale + 2 %). Durch die vertikale Projektion auf die Null-Diagonale liest sich das transformierte Raumgewicht zu 1,985 t/m³, welches als γ_2' auf die $z = 2$ %-Ordinate horizontal übertragen wird. Auf gleiche Weise werden weitere Punkte der transformierten Raumgewichtskurve ermittelt.

Mit den so erhaltenen Punkten wird die transformierte Raumgewichtskurve gezeichnet. Da man sich bei Kontrollversuchen ohnehin in der Nähe des Optimums bewegt, kann mit genügender Genauigkeit die Kurve als Parabel mit senkrechter Axe angenommen werden. Diese Parabel ist durch drei Punkte bestimmt. Zur Ermittlung des Scheitelpunktes, tatsächlich der einzige Punkt der als Maximum interessiert, dient am einfachsten entweder eine geometrische Konstruktion oder eine analytische Ermittlung der Koordinaten (in Tabellenform oder graphisch ausgewertet). Beide Methoden werden im Anhang zu diesen Ausführungen erläutert.

Zur Bestimmung der Quotienten D und C werden wiederum die Diagonalen, Bild 3, benützt. Dabei ist zu beachten, dass die Bezugsgrössen (100 %), nämlich das maximale transformierte Raumgewicht, bzw. das Zylinder-Raumgewicht, horizontal auf die Null-Diagonale projiziert werden. Die Quotienten ergeben sich durch das Ablesen der Schnittpunkte der entsprechenden Vertikalen mit der Abszisse des Feldfeuchtraumgewichtes.

Die Differenz zwischen dem optimalen Wassergehalt und dem Feldwassergehalt setzt sich zusammen aus dem Abszissenwert des Parabel-Scheitelpunktes und der durch die gestrichelten Kurven angedeuteten Korrektion Δ. In dem behandelten Beispiel, Bild 3, liest sich z_m zu 1,3 %. Da das maximale transformierte Raumgewicht praktisch auf der Korrektionslinie +0,2 liegt, ergibt sich also $w_o - w_f$ zu 1,3 + 0,2 % oder 1,5 %.

Die Umwandlung der Korrektionsform für z_m nach Gleichung (9) auf eine additive Form mittels Δ bezweckt eine Vereinfachung der Versuchsauswertung. Zur Ermittlung der gestrichelten Korrektionskurven (Bild 3) gilt — ausgehend von der Gleichung (9) — der Ansatz:

$$(10) \quad w_o - w_f = z_m \frac{1 + w_o}{1 + z_m} = z_m + \Delta$$

$$(11) \quad \Delta = z_m \frac{w_o - z_m}{1 + z_m}$$

oder

$$(12) \quad w_o = \Delta \frac{1 + z_m}{z_m} + z_m$$

worin für Δ die Parameterwerte (+0,2/+0,4 % usw.) eingesetzt werden können. Nun muss w_o in Form von maximalem transformiertem Raumgewicht, in dessen Funktion ja die Korrektion gesucht wird, ausgedrückt werden. Dazu dient die Korrelation nach Bild 2:

$$(13) \quad \gamma_{e\,max}\,(1 + w_o) = f\,[w_o]$$

$$(14) \quad \gamma_{max\,trans} = \gamma_{e\,max}\,(1 - w_f) = \gamma_{e\,max} \frac{1 + w_o}{1 + z_m} = \frac{f\,[w_o]}{1 + z_m}$$

IV. Vorteile dieser Methode

Was die Verdichtungskontrolle vor allem interessiert, sind nicht so sehr die absoluten Werte des Trockenraumgewichtes und des Wassergehaltes, sondern lediglich die Beziehung dieser zu den Standard-Verdichtungswerten. Die dargelegte Methode nach J. Hilf vermittelt diese Beziehungen mit für die praktischen Bedürfnisse genügender Genauigkeit in etwa 30 bis 60 Minuten, je nach Materialart und Verdichtungsenergie, vor allem aber je nach dem, ob eine Abminderung des Wassergehaltes umgangen werden kann oder nicht. Im letztgenannten Fall kann kaum oder nur zeitraubend mit gleichen Wassergehaltsintervallen (z. B. — 2 %, — 4 %) gearbeitet werden. Ist das Material sehr lehmig, so kann das gute Durchmischen mehr Zeit beanspruchen als bei weniger lehmigen oder siltigen Materialien. Unter Umständen ist der Gebrauch eines maschinellen Mischers (eine Art Teigmischer) wünschenswert. Die Kenntnis des Feld-Wassergehalts, der gewöhnlich aus Vollständigkeitsgründen nachträglich und konventionell bestimmt wird, ist für den eigentlichen Kontrollversuch nicht notwendig.

Ausser dem Vorzuge, die Kontrollwerte in kurzer Zeit und genügend genau zu liefern, hat die Methode nach J. Hilf noch den weiteren wesentlichen Vorteil, dass mögliche Streuungen der Verdichtungskennwerte infolge Variation der anfallenden Materialien aus einer Entnahmezone automatisch berücksichtigt werden. Jeder Kontrollversuch schliesst einen Proctor Standard-Versuch an dem zu kontrollierenden

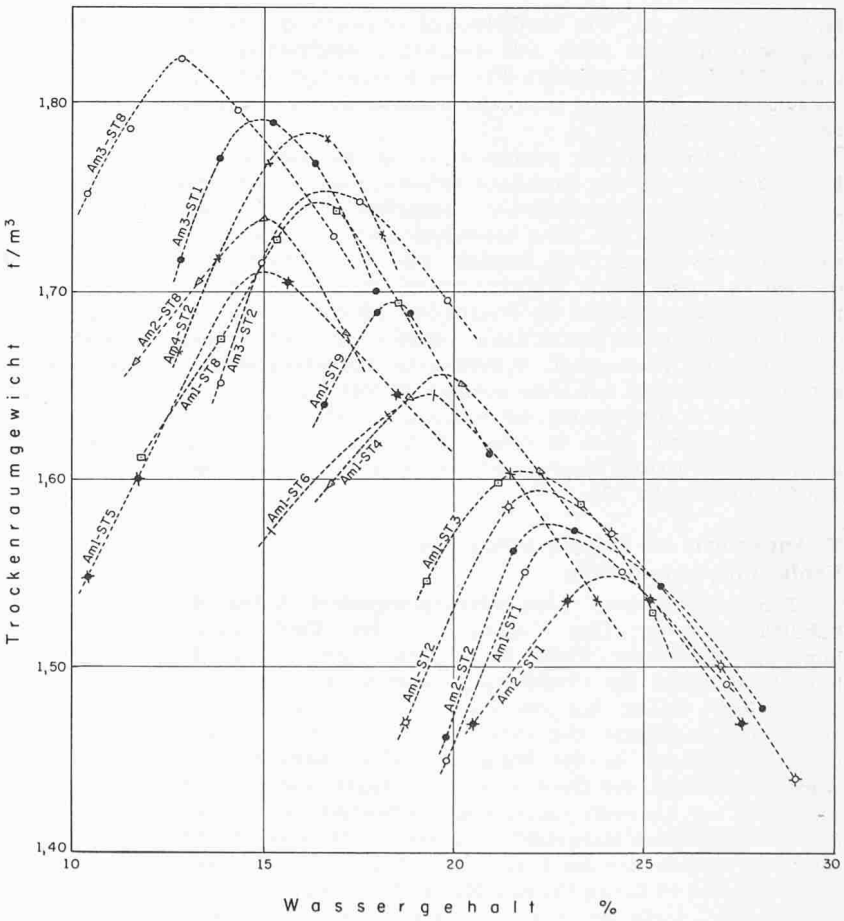

Bild 4. Proctor-Verdichtungskurven von Proben aus der Entnahmezone eines Dammes in Brasilien. Variationen mit Flächenausdehnung und Tiefe. Quelle: Literaturverzeichnis [3]

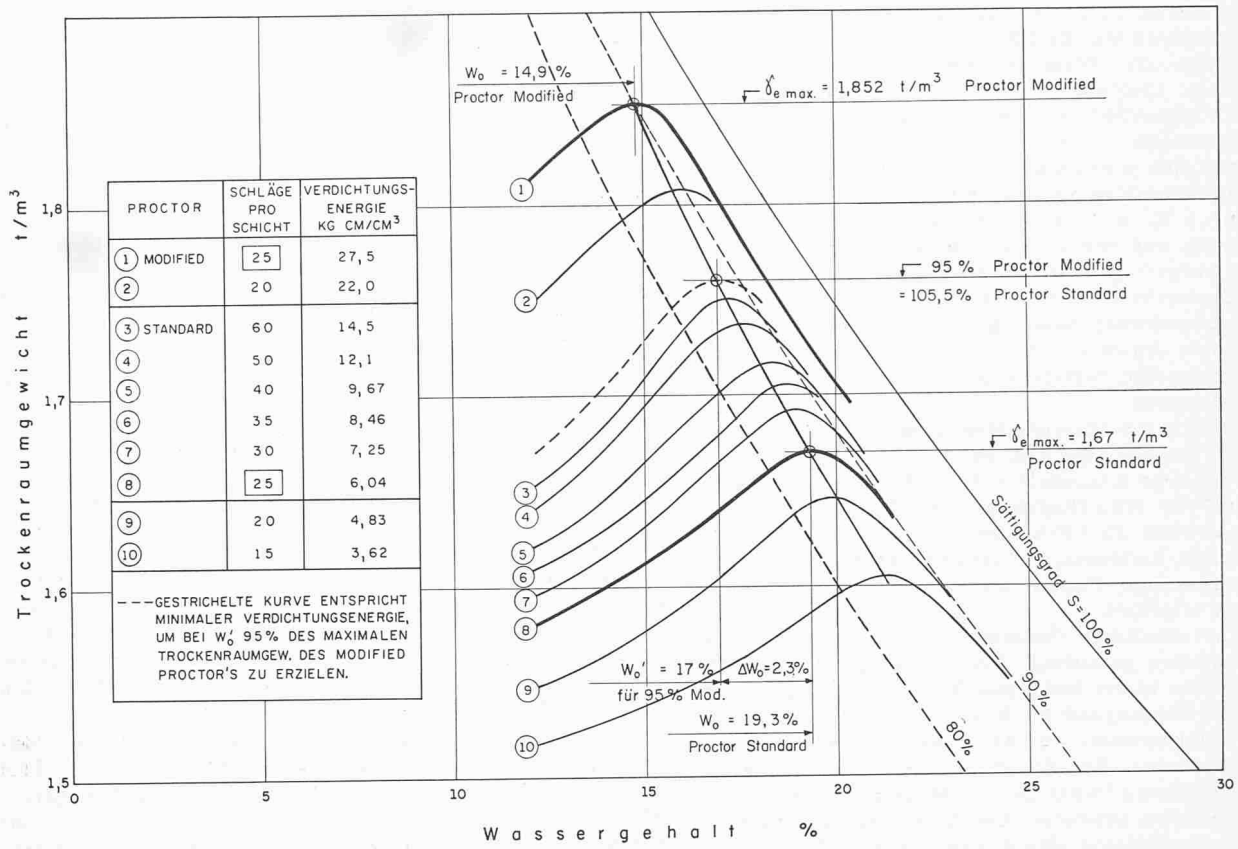

Bild 5. Einfluss der Verdichtungsenergie auf das maximale Trockenraumgewicht und den optimalen Wassergehalt, und Gegenüberstellung der Verdichtungskennwerte des Proctor-Modified und Proctor-Standard. Materialprobe von der Ilha d'Agua (Klassifikation dieses Materials siehe Bild 6)

Material selbst ein. Die Verdichtungskennwerte der Schüttung werden nicht mehr mit vorgängig bestimmten und nach Materialart klassierten Proctor-Kennwerten der Entnahmezone in Beziehung gebracht, sondern direkt mit jenen des selben Materials.

Dieser Umstand ist ebenso stark zu werten, wie die kurze Zeit, in der die Resultate erhältlich sind; denn gewisse Variationen des anfallenden Materials sind fast immer zu erwarten. Dies gilt ganz besonders auch dann, wenn es sich um verwitterten Fels handelt. Bild 4 illustriert einen solchen Fall, eine grosse Entnahmezone für einen Erddamm mit homogenem Aufbau im Staate São Paulo in Brasilien, der die Variation mit horizontaler Ausdehnung wie vor allem auch mit der Tiefe zeigt. Spezifizierte Forderungen über Einbauwassergehalt bei einer solchen Vielfalt von Variationen sind unter Anwendung der bisherigen Kontrollmethoden äusserst fraglich. Auch in diesem Fall wurde die Methode nach Hilf mit Erfolg angewendet. Die Angaben entstammen der Literaturquelle [3].

V. Anwendung bei aussergewöhnlicher Verdichtungsanforderung

Eine interessante Anwendungsgelegenheit boten die Schüttarbeiten der Ilha d'Agua, zu deren Verdichtungskontrolle die Firma Rodio S. A. beigezogen wurde. Es handelt sich um die Umformung einer kleinen Insel von rd. 0,5 km², welche für die Plazierung von Oelbehältern der neuen Raffinerie der *Petrobras* (staatliche Oelgesellschaft Brasiliens) in der Bucht von Guanabara benötigt wurde. Die Kuppe der Insel wurde abgetragen und zur Aufschüttung der niederen Randgebiete verwendet, um so, auf drei Koten, flachen Baugrund zu gewinnen. Da diese Schüttung die Oelbehälter zu tragen hat, wurde für den Verdichtungsgrad 95 % des Proctor Modified verlangt.

Die dargelegte Methode nach Hilf gilt für den Proctor Standard wie auch für den Proctor Modified. Die theoretischen Betrachtungen sind grundsätzlich unabhängig von der spezifischen Verdichtungsenergie.

Würde dagegen der Proctor Modified als Kontrollversuch benützt, so wäre der Versuch immer auf der trockenen Seite des Feldwassergehaltes, weil dieser für eine 95 %-ige Verdichtung höher sein soll als der optimale (siehe Bild 5). Das würde also bedingen, dass die Probe für den Kontrollversuch angetrocknet werden muss, was aber sehr zeitraubend und auch ungenau und deshalb höchst unerwünscht ist.

Erst wurde also die Spezifikation in dem Sinn geändert, dass die geforderte Verdichtung auf den Proctor Standard bezogen wurde. Für das Material der Ilha d'Agua ergab sich 95 % Proctor Modified ungefähr gleichbedeutend wie 105 % des Proctor Standard. Für eine Probe, deren Klassifikationscharakteristiken in Bild 6 zusammengefasst sind, ist der Zusammenhang von Wassergehalt und max. Trockenraumgewicht mit variierender Verdichtungsenergie in Bild 5 dargestellt.

Der Kontrollversuch, ausgeführt mit der Verdichtungsenergie nach Proctor Standard, ergibt einen optimalen Was-

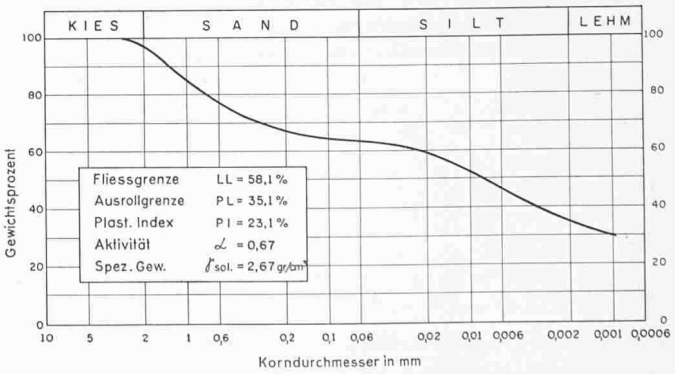

Bild 6. Kornverteilung und Klassifikationscharakteristik der in Bild 5 bezogenen Materialprobe der Ilha d'Agua

sergehalt w_o von 19,3 %, während der für 105 % Proctor Standard tatsächlich günstigste Einbauwassergehalt w_o' um 2,3 % tiefer liegt. Wird also diese Bedingung für den Einbauwassergehalt erfüllt, so erreicht man im Kontrollversuch das maximale transformierte Raumgewicht, indem man lediglich Wasser zufügt. Ergibt der Kontrollversuch eine Wassergehaltsdifferenz $w_o - w_f$ von 2,3 %, so zeigt dies an, dass der für 105 % Proctor Standard günstigste Einbauwassergehalt w_o' eingehalten wurde.

Zur Erläuterung dieser Ausführungen wie auch als numerisches Beispiel eines Kontrollversuches ohne Benutzung der graphischen Auswertung (nach Bild 3) dient Bild 7. Der Verdichtungsgrad D ergibt 105 % und befriedigt damit die Anforderungen. Die Wassergehaltsdifferenz $w_o - w_f$ zeigt, nach Anbringung der Korrektur gemäss Gleichung (9), 3,1 %. Somit liegt der Feldwassergehalt um 3,1 — 2,3 = 0,8 % unter dem günstigsten Einbauwassergehalt für 105 % Proctor Standard.

VI. Umgehung des Antrocknens der Proben

Eine schwerwiegende Beeinträchtigung der Verdichtungskontrolle nach Hilf bedeutet — sofern dies notwendig wird — das Antrocknen der Probe. Dies wurde auch schon an der Konferenz in Mexiko [1] von W. A. Clevenger als grosser Nachteil in die Diskussion geworfen.

Vor allem wird die Genauigkeit in Frage gestellt. Es handelt sich um sehr kleine Wassermengen, welche der Probe durch Verdunstung (mittels Warmluftstrahl) entzogen werden sollen. Bei einer für den Proctorzylinder genügenden Feuchtprobe von 2½ kg entspricht das Gewicht nach einer Abminderung um —2 % noch 2450 gr. Das gleichmässige Durchmischen und das Verhüten von excessiv ausgetrockneten Krusten — zumal bei lehmigen Materialien — sind sehr fraglich. Bei Wassergehaltszunahme, wo das Wasser vor der Zugabe gemessen wird (bei 2½ kg Probengewicht entsprechen 2 % 50 cm³ Wasser) sind die Möglichkeiten einer guten Durchmischung und damit einer gleichförmigen Verteilung des Wassergehaltes viel besser. Ferner ist das Antrocknen viel zeitraubender als das Zugeben von Wasser.

In der Arbeit von 1959 von J. Hilf [2] wird vorgeschlagen, in Fällen, wo der Feldwassergehalt gleich oder grösser als der optimale ist, den Parabelscheitelpunkt auch aus den Werten nur eines Parabelastes (nur Zugabe von Wasser) rückwärts zu extrapolieren. Die Genauigkeit leidet, je weiter die drei Versuchspunkte vom Scheitelpunkt entfernt sind. Die im Anhang zu diesen Ausführungen gegebene analytische Methode zur Bestimmung der Scheitelkoordinaten findet auch für diesen Fall Anwendung, wobei beide Differenzordinaten negativ und der Ordinatenquotient zwischen +2 und +4 liegt (Skala rechts und unten, Bild 10).

Nach den Darlegungen im Kapitel V liegt der Gedanke nahe, in Fällen, wo der Feldwassergehalt gleich oder grösser als der optimale Wassergehalt nach Proctor Standard ist, also eine Antrocknung der Probe notwendig wäre, für den Kontrollversuch eine niedrigere Verdichtungsenergie zu wählen. Da für diese «Vergleichsverdichtung» der optimale Wassergehalt höher liegt (vergleiche Bild 5), kann jene transformierte Raumgewichts-Parabel mit Versuchspunkten um den Scheitelpunkt bestimmt werden, indem nur Wasser zugefügt wird. Bild 8 veranschaulicht diese Verhältnisse.

Aus dem Kontrollversuch mit der Vergleichsverdichtung ergibt sich die Wassergehaltsdifferenz $\Delta w'$ als Differenz zwischen dem Vergleichsoptimum und dem Feldwassergehalt. Da aber der optimale Wassergehalt nach Proctor Standard um Δw_o niedriger ist als das Vergleichsoptimum, ergibt sich die wahre Wassergehaltsdifferenz $w_o - w_f$ als Differenz zwischen $\Delta w'$ und Δw_o (Bild 8).

Analog entspricht 100 % des maximalen Trockenraumgewichts nach Proctor Standard $(100 + p)$ % desjenigen nach der Vergleichsverdichtung. Das Feldtrockenraumgewicht muss mit $(100 + p)$ % des max. Trockenraumgewichtes der Vergleichsverdichtung in Beziehung gebracht werden. Wird 100 % Proctor Standard verlangt, so muss q gleich oder grösser als p sein (Bild 8).

Die für diese Umgehungsmethode notwendigen Grössen Δw_o und p müssen vorgängig bestimmt werden. Vielleicht wird es möglich sein, mit künftigen Erfahrungswerten diese Grössen — ähnlich der in Bild 4 dargestellten Beziehung — in Abhängigkeit des maximalen Feuchtraumgewichtes zu erfassen. Die Grössen Δw_o und p sind für eine bestimmte Vergleichsverdichtung materialabhängig, wie auch die Beziehung zwischen Proctor Standard und Modified von der Materialart abhängt. Die Variationen sind jedoch relativ gering, weil auch der Unterschied der Verdichtungsenergie nicht so gross gewählt wird.

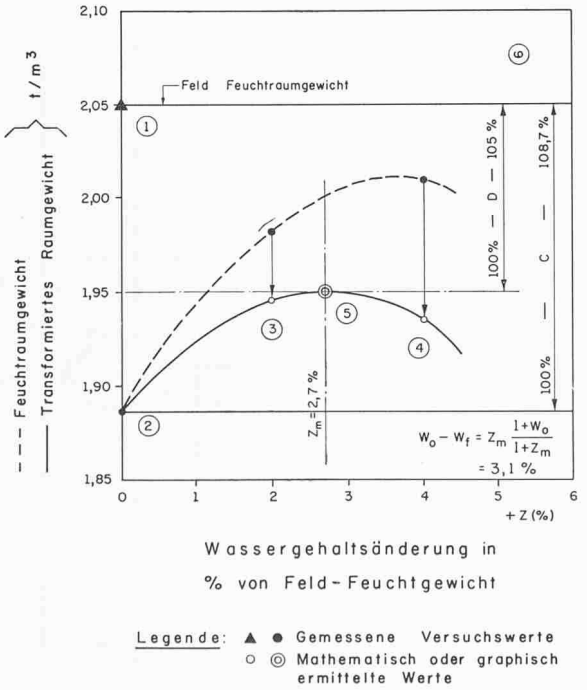

Bild 7. Diagramm eines Kontrollversuches bei spezifiziertem Verdichtungsgrad grösser als 100%. Numerisches Beispiel von Ilha d'Agua. Die Kreisnummern entsprechen den in Kapitel II beschriebenen einzelnen Schritten

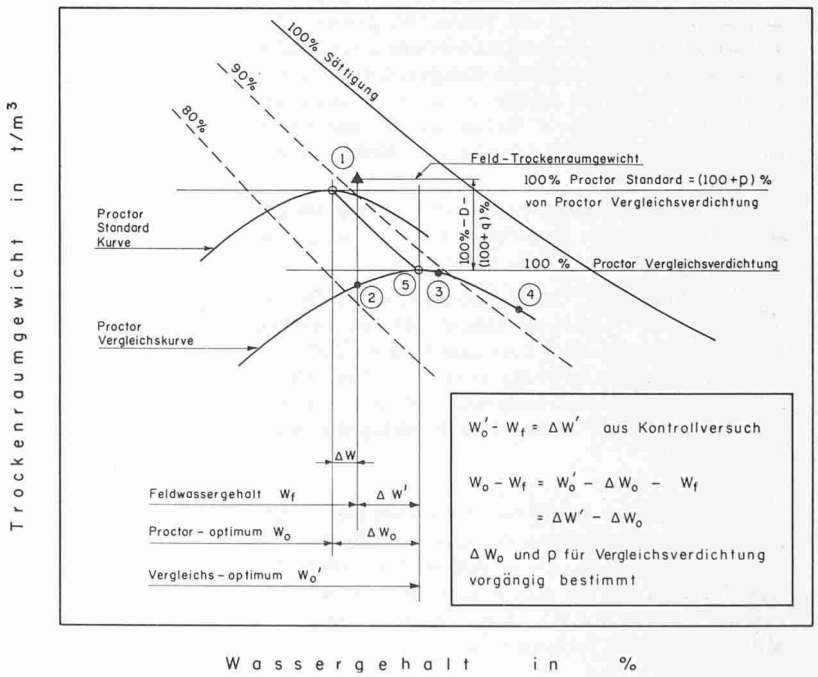

Bild 8. Schematische Darstellung des Verfahrens zur Umgehung des Antrocknens der Probe mittels Verwendung einer geringeren Energie als Vergleichsverdichtung. Die Kreisnummern entsprechen den in Kapitel II beschriebenen einzelnen Schritten

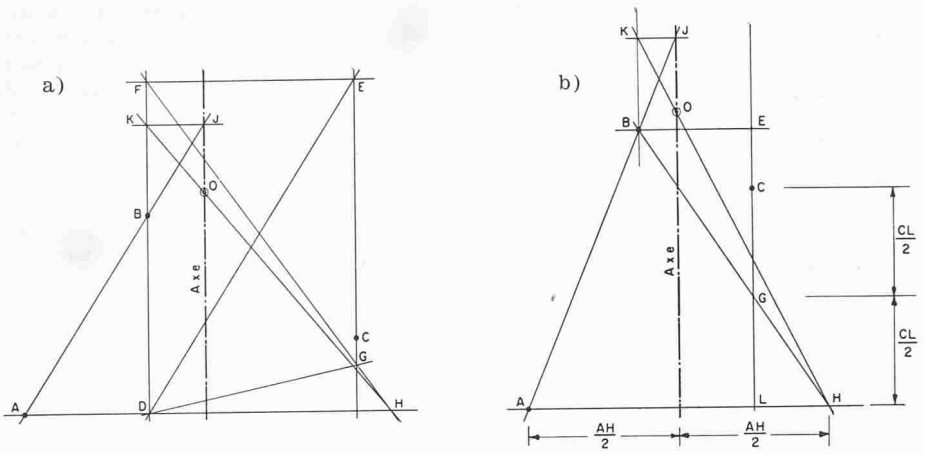

Bild 9. Geometrische Konstruktion des Parabel-Scheitelpunktes aus drei Punkten *A*, *B* und *C*. a) beliebige Abszissenintervalle, b) Abszissenintervall zwischen *A* und *B* gleich jenem zwischen *B* und *C*.

a) Geometrische Ermittlung (Bild 9a)

1. Horizontale Basislinie durch *A*, vertikale Linie durch *B* und *C*.
2. *DE* parallel zu *AB* ergibt *E* auf der Vertikalen durch *C*.
3. Horizontale Projektion von *E* auf die Vertikale durch *B* ergibt *F*.
4. *DG* parallel zu *AC* ergibt *G* auf der Vertikalen durch *C*.
5. *FG* ergibt *H* auf der Basislinie. Mittelsenkrechte zu *AH* ist die Parabelaxe.
6. *AB* ergibt *J* auf der Axe, horizontale Projektion von *J* auf die Vertikale durch *B* ergibt *K*.
7. *KH* schneidet *Axe* in *O*.

b) Geometrische Ermittlung, jedoch bei Abszissenintervall zwischen A und B gleich jenem zwischen B und C (Bild 9b).

Schritt 2 bis 4 unter a) vereinfachen sich. Punkt *F* fällt zusammen mit *B*, und *G* liegt in der Mitte zwischen der Basislinie und *C*. So verbleiben noch folgende Schritte:

1. wie Schritt 1 unter a).
2. *G* in der Mitte zwischen *C* und *L*.
3. *BG* ergibt *H* auf der Basislinie. Mittelsenkrechte zu *AH* ist die Parabelaxe.
4. wie Schritt 6 unter a).
5. wie Schritt 7 unter a).

Die in Bild 8 dargestellten Funktionen in Abhängigkeit von Trockenraumgewicht und Wassergehalt lassen sich leicht umdenken zu Funktionen in Abhängigkeit von transformiertem Raumgewicht (= Trockenraumgewicht × $[1+w_f]$) und Wassergehaltsänderung z ($=[w-w_f]/[1+w_f]$, insbesondere $z=0$ bei w_f), um wiederum die beim Kontrollversuch bestimmten Grössen zu benützen. Die Kreiszahlen entsprechen wieder den in Kapitel II beschriebenen einzelnen Schritten.

Es sei noch vermerkt, dass für die Vergleichsverdichtung, welche geringere Verdichtungsenergie benützt als der Proctor Standard, die Anzahl Schläge von 25 besser beibehalten, dagegen die Fallhöhe oder das Hammergewicht verringert wird. In Bild 5 wurde lediglich zur leichteren Veranschaulichung der Verhältnisse die Schlagzahl verändert.

VII. Schlussfolgerungen

Im Gegensatz zu früheren Methoden ergibt die Verdichtungs-Kontrollmethode nach J. Hilf in sehr kurzer Zeit auch genügend genaue Resultate und ist der Kapazität modern ausgerüsteter Erdbewegungsunternehmungen durchaus gewachsen. Sie wurde ausser in ihrem Ursprungsland USA (Bureau of Reclamation) bereits in einer Anzahl anderer Länder mit Erfolg angewendet.

Wie an Hand eines praktischen Beispiels gezeigt wird, eignete sich diese Methode auch für aussergewöhnliche Verdichtungsgrade.

Zur Umgehung des Antrocknens der Probe, dem einzigen fraglichen Aspekt der behandelten Kontrollmethode, wird hier eine Möglichkeit mittels Vergleichsverdichtung vorgelegt. Dieses Verfahren gibt eine befriedigende Lösung zur Behebung des bisher schwachen Punktes der Kontrollmethode.

Der Verfasser dankt der *Petrobras* für die Erlaubnis zur Auswertung der auf der Ilha d'Agua gewonnenen Daten. Dank schuldet er auch der Geschäftsleitung der Rodio S. A., Rio de Janeiro, für die Unterstützung dieser Arbeit, sowie den Mitarbeitern des Laboratoriums.

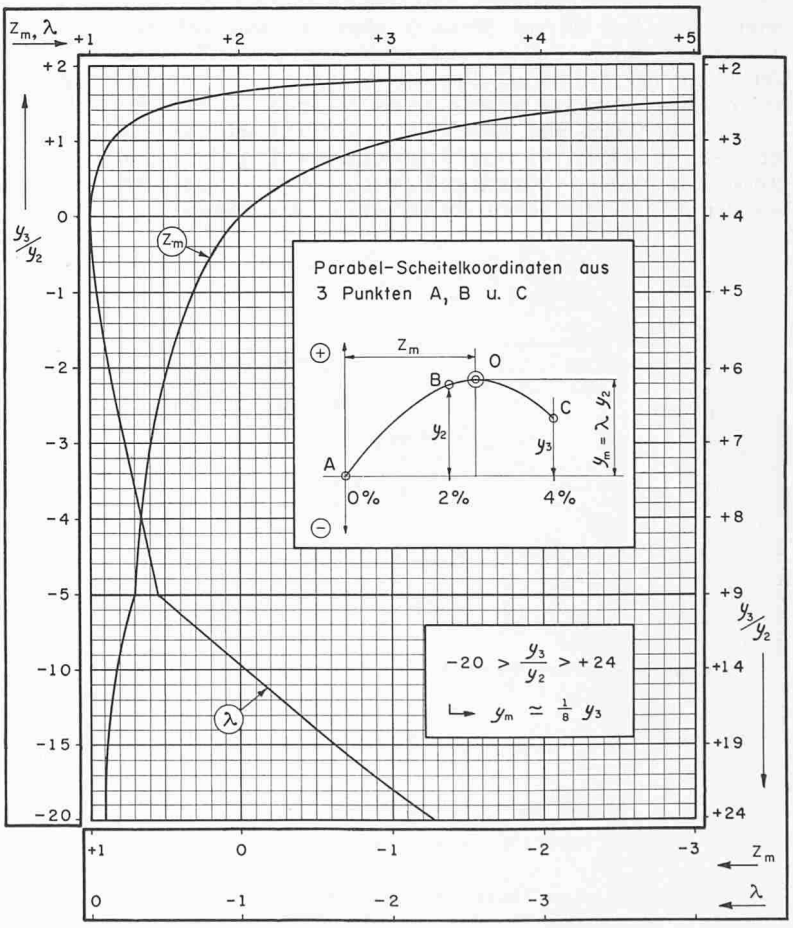

Bild 10. Koordination des Scheitelpunktes einer Parabel mit senkrechter Axe aus drei Punkten *A*, *B* und *C*. y_2 ist gleich der Differenz der Ordinaten von *B* und *A*, y_3 gleich jener von *C* und *A*. Ist das Abszissenintervall zwischen *A* und *B*, bzw. zwischen *B* und *C* gleich 1%, so muss das eruierte z_m mit 0,5 multipliziert werden. Ist es dagegen 3%, so muss z_m mit 1,5 multipliziert werden.

Anhang

1. Ermittlung des Parabelscheitelpunktes *O*

Gegeben: Punkte *A*, *B* und *C* auf der Parabel, Axe parallel zur Ordinate.

c) Analytische Ermittlung der Koordinaten des Scheitelpunktes

Der Ursprung des Koordinatensystems wird einfachheitshalber in den Punkt A gelegt. Damit sind die Koordinaten von A null, jene von Punkt B z_2 und y_2, jene von Punkt C z_3 und y_3 und jene des Scheitelpunktes O z_m und y_m. Die allgemeine Parabelgleichung lautet somit:

$$(15) \quad (z - z_m)^2 = -2p\,(y - y_m)$$

Mittels der Koordinaten von A (null) bestimmt sich $2p$ zu:

$$(16) \quad 2p = \frac{z_m^2}{y_m}$$

Damit wird Gleichung (15) zu:

$$(17) \quad (z - z_m)^2 = -\frac{z_m^2}{y_m}\,(y - y_m)$$

Mittels der Koordinaten von B und C sind die beiden Unbekannten z_m und y_m der quadratischen Gleichung (17) bestimmt und in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

	$z_3 = 2\,z_2$	$z_2 = 2\,\%$ $z_3 = 4\,\%$
$z_m =$	$\frac{z_2}{2}\,\frac{(4\,y_2 - y_3)}{(2\,y_2 - y_3)}$	$\frac{4\,y_2 - y_3}{2\,y_2 - y_3}$
$y_m =$	$\frac{1}{8}\,\frac{(4\,y_2 - y_3)^2}{(2\,y_2 - y_3)}$	

Zur praktischen Auswertung wurden die Bestimmungsgleichungen für z_m und y_m graphisch dargestellt, und zwar zur Umgehung von Kurvenscharen in Funktion des Quotienten y_3/y_2 (Bild 10). Um auf gleichem Raum grössere Genauigkeit zu gewähren, wurde der symmetrische Charakter der Funktionen ausgenützt, indem unter Angabe der entsprechenden Skalen nur je ein Kurvenast gezeichnet wurde. Es muss also beachtet werden, dass bei Benutzung der linken, bzw. rechten Skala für den Quotienten y_3/y_2 die Werte für z_m und λ nur auf der oberen, bzw. unteren Skala abgelesen werden. Zur Erhöhung der Genauigkeit im Bereich des Quotienten wurde für Werte unter —5 und über +9 ein fünfmal kleinerer Masstab benützt. Für Quotientwerte kleiner als —20 und grösser als +24 (dies tritt ein, wenn y_2 praktisch null ist) kann z_m gleich 1 % gesetzt werden und y_m wird als Produkt von y_3 ausgedrückt, und zwar ist y_m gleich $y_3/8$.

2. Erläuterungen der Bezeichnungen

γ_f = Feld-Feuchtraumgewicht in t/m³.

γ_{tr} = Feld-Trockenraumgewicht in t/m³.

γ_e = Trockenraumgewicht (im Zylinder) in t/m³.

$\gamma_{e\,max}$ = Maximales Trockenraumgewicht, welches bei w_o erzielt wird, in t/m³.

γ_{trans} = transformiertes Feuchtraumgewicht,
= Zylinder-Feuchtraumgewicht / $(1 + z)$,
= $\gamma_e\,(1 + w_f)$.

$\gamma_{max\,trans}$ = maximales transformiertes Raumgewicht in t/m³.

w = Wassergehalt in % von Trockengewicht.

w_f = Feld-Wassergehalt in %.

w_o = optimaler Wassergehalt, $\gamma_{e\,max}$ des Proctor Standard zugehörend.

w_o' = optimaler Wassergehalt, Vergleichsverdichtung zugehörend.

Δw_o = $w_o' - w_o$, Differenz zwischen den optimalen Wassergehalten der Vergleichsverdichtung und des Proctor Standard.

Δw = Differenz zwischen dem optimalen Wassergehalt (Standard) und dem Feldwassergehalt.

$\Delta w'$ = Differenz zwischen dem optimalen Wassergehalt (Vergleichsverdichtung) und dem Feld-Wassergehalt.

z = Wassergehaltsänderung in % von Feld-Feuchtgewicht.

z_m = optimalem Wassergehalt zugehörende Wassergehaltsänderung in % von Feld-Feuchtgewicht, nach Anbringung der Korrektion gleich w_o.

D = Verdichtungsgrad, Verhältnis des Feld-Trockenraumgewichtes zu max. Proctor-Trockenraumgewicht mal 100 in %.

C = «Energie-Quotient», Verhältnis des Feld-Trokkenraumgewichtes zu Zylinder-Trockenraumgewicht verdichtet beim Feld-Wassergehalt, mal 100 in %.

3. Literatur-Verzeichnis

[1] *Jack W. Hilf,* 1957: A Rapid Method of Construction Control For Embankments of Cohesive Soil, Conference on Soils for Engineering Purposes, Mexico, December 1957.

[2] *Jack W. Hilf,* 1959: A Rapid Method of Construction Control For Embankments of Cohesive Soil, U. S. Bureau of Reclamation, Engineering Monographs No. 26, Denver, October 1959.

[3] *Hamilton G. Oliveira,* Secção de Solos do I. P. T. (Instituto de Pesquisas Tecnologicas) São Paulo, 1959: O Controle de Compactação de Obras de Terra pelo Método de Hilf, A B M S, Nucleo Regional de São Paulo, Boletim 3, Fevereiro 1959.

[4] *Levy Kuczinski,* 1950: Estudo Estatistico da Correlação Entre as Caracteristicas de Compactação dos Solos Brasileiros, Relatorio final de Bolsa de Estudo na Secção de Solos do I. P. T.

[5] *Bureau of Reclamation,* 1958: Earth Manual, Tentative Edition, Denver, Colorado, 1958.

[6] *T. W. Lambe,* 1951: Soil Testing for Engineers, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Adresse des Verfassers: *Hans U. Scherrer,* dipl. Ing., RODIO S. A., Caixa Postal 1715, Rio de Janeiro, Brasil

Mitteilungen

Strassenbrücke bei Västerås, Schweden. Diese neue, total 257 m lange Betonbrücke besteht aus einem Mittelfeld von 40 m und 12 Randfeldern von 16 bis 18 m Spannweite. Wegen besonders ungünstiger Untergrundverhältnisse und der grossen Höhe über Gelände entschloss man sich, für alle Randfelder vorfabrizierte Träger zu verwenden, die nach dem System BBRV vorgespannt sind. Die durchlaufenden Träger und die sehr schlanken Pfeilersäulen bilden ein Rahmentragwerk. Der Arbeitsvorgang verlief folgendermassen: Zuerst wurden mittels Gleitschalung die Säulen erstellt und je zwei von ihnen durch einen Querträger verbunden, von dem zunächst der Unterflansch und dann die Verstärkungen für die massgebenden negativen Momente betoniert wurden. Danach verlegte man die im Werk vorfabrizierten, bis 24 t schweren Hauptträger. Anschliessend betonierte man die Querträger auf bis UK Fahrbahnplatte und spannte sie vor (System Dywidag). Im letzten Abschnitt wurde die Platte betoniert und vorgespannt, und zwar zuerst im Stützenbereich, später in Feldmitte. Es gelang so, eine zusätzliche Montagearmierung fast völlig einzusparen. Das fertige, in «Beton- und Stahlbetonbau», Heft 3, 1961, beschriebene Bauwerk wirkt ausserordentlich leicht.

Neuer pneumatischer Handprogrammschalter. Der Mangel an Arbeitskräften und das Streben nach rationellerer Produktion führen heute dazu, dass viele Fabrikationsvorgänge in der chemischen und den verwandten Industrien automatisiert werden müssen, deren Ablauf bisher weitgehend nur von Hand gesteuert wurde. Dies trifft in besonderem Masse für die diskontinuierliche, d. h. chargenweise Produktion zu, wo der Uebergang von einer Produktionsphase auf die nächste häufig eine ganze Reihe von Manipulationen (Sollwertverstellungen an Reglern, Ventilumschaltungen) erfordert, von deren einwandfreien Durchführung sehr viel abhängen kann. Zur Lösung der bei solchen Automatisierungsaufgaben auftretenden Probleme hat Sauter einen nach dem Baukastenprinzip aufgebauten, vielseitig verwendbaren Programmschalter entwickelt. Mit ihm können von einer zentralen Kommandostelle aus beliebig viele Stellorgane, Regel-