

Zeitschrift:	Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber:	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band:	83 (1965)
Heft:	23
Artikel:	Ein Beitrag zur neuzeitlichen Bodenuntersuchung: der Triax "3000" der Kraftwerke Mattmark AG
Autor:	Gilg, B.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-68182

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: 15.01.2026

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

sind sehr viele bereit, es zu tun, doch fehlt bis heute der zündende Funke.

3. Verkehrspolitik

Wenn ich für diesen Abschnitt den Oberbegriff «Verkehrspolitik» als Titel wähle, so tue ich das bewusst. Ich will damit unterstreichen, dass wir, wenn wir von Verkehr als Bestandteil der Planung reden, nur noch als Ganzes von ihm reden können. Die Zeit ist vorbei, wo man sich als Fussgänger, Trampassagier oder Automobilist ausgeben konnte; heute ist jeder jedes, und je grösser die Stadtregion wird, umso mehr trifft das zu. Die Zeit ist vorbei, da man von Stadtverkehr und Vorortverkehr reden konnte. Es gibt, was den Verkehr betrifft, keine Grenzen mehr, weder örtliche noch solche der Kompetenzbereiche. Wenn wir nicht alle am gleichen Strick und in der gleichen Richtung ziehen, so bleibt der Karren im Sumpfe stecken. Ist es nicht sinnlos, wenn wir uns über Lappalien, über Personen, über Ämter streiten, wenn die Masse Tag für Tagträger wird und zäher fliesst? Ist es nicht traurig oder gar dumm, wenn wir uns über die Zuteilung der Mittel zanken, die wir nicht einmal haben? Ist es nicht fruchtloses Unterfangen, dass wir uns gegenseitig den Schwarzen Peter zuspielen, wenn ringsum uns herum sogar ärmere Länder wie Österreich und Italien zur Tat schreiten und die veralteten Verkehrssysteme ihrer Grossstädte tatkräftig erneuern? Der Verkehr ist eine Einheit. Wenn wir als Automobilisten den öffentlichen Verkehr fördern, nützen wir uns als Benutzer desselben und als Fussgänger, als die wir schliesslich geboren sind. Wenn wir uns als Fussgänger und Trampassagiere für den Bau von Parkhäusern und Hochleistungsstrassen einsetzen, so nützen wir uns – diesmal als Automobilisten ebenfalls. Wenn wir als Stadtbewohner die Verkehrseinrichtungen unserer Stadt modernisieren, helfen wir nicht nur uns, sondern all denen auch, die täglich zu uns zur Arbeit fahren. Wenn wir als Vorortbewohner der Stadt helfen, ihren Verkehr zu sanieren, so unterstützen wir nicht nur die Stadt, die kaum noch in der Lage ist, ihn wirklich zu sanieren, sondern wir nützen natürlich auch uns selbst. Diese Betrachtungen könnten auch auf die Behörden, die städtischen, gemeindlichen, kantonalen und eidgenössischen ausgedehnt werden, um nachzuweisen, dass Mauern – mittelalterlichen Schutzwällen gleich – geschleift werden müssen. Es geht nicht darum, hier oder dort Lorbeeren zu ernten, sondern darum, ein Verkehrssystem zu verwirklichen, welches den Anforderungen der Zeit und der Zukunft gerecht zu werden vermag. Je grösser die Stadtagglomerationen werden (im Inland wie im Ausland stellen wir die Zusammenballungen fest), umso mehr müssen wir über den Verkehr derselben als Einheit nachdenken: über den kollektiven und den individuellen, den Berufsverkehr und den Wirtschafts- oder Besucherverkehr, über den zirkulierenden und den ruhenden, über den gemeindlichen und regionalen. Und schliesslich, wenn wir die Dinge ganz durchdenken, dann müssen wir uns auch Rechenschaft darüber geben, wer bezahlen soll, was der Verkehr verlangt. Tragen muss es die Volkswirtschaft, darüber sind wir Fachleute uns schon lange klar, aber der einzelne Bürger hofft immer noch, sein Staat springe für ihn ein. Dabei sind doch wir dieser Staat.

4. Sofortprogramm

Heute dürfte es bereits zum Allgemeingut gehören, dass noch einige Jahre vergehen werden, bis wir an die Lösung der «grossen Verkehrsanierung» herantreten können. Ich meine damit den Bau eines modernen Massentransportmittels, den Autobahnring, die Hochleistungsstrassen, den Cityring usw. Wir wissen, dass noch Vorfahren rechtlicher und finanzieller Art getroffen werden müssen, bis überall die Baumaschinen installiert werden können. Diese Zeit aber müssen wir sinnvoll nutzen. Die Mittel, die uns heute schon zur Verfügung stehen, müssen wir zielstrebig und mit dem Blick aufs Ganze einsetzen. Aus dem Bestand muss herausgeholt werden, was herauszuholen ist. Der gangbare Weg ist mit dem Sofortprogramm aufgedeckt. Der Stadtverwaltung bin ich dankbar, dass sie ihn nun zu beschreiten beginnt. In nächster Zeit werden sich die Projekte und Vorlagen – so hoffe ich – häufen, die den Bau der Westtangente und die Verbesserung einzelner Haupttaxen des täglichen Berufsverkehrs zum Inhalt haben. Der vierte Brocken – so möchten Sie wohl schliessen – wird bereits bearbeitet. Ja, das stimmt, die Beamten der Stadt tun es. Aber genügt das? Die Verankerung dieses Gedankens im Bewusstsein des Stimmbürgers ist noch nicht weit gediehen; diejenigen, die ausserhalb unserer Stadt wohnen, haben überhaupt noch nicht Kenntnis davon genommen, dass wir uns – force majeure – zu diesem reduzierten Programm durchringen mussten. Aus diesem Grunde lege ich Ihnen auch diesen Brocken vor, damit alle Einsichtigen uns helfen, Mauersteine aus ihm zu formen. Wollen wir etwa in einem Jahrzehnt bereit sein, um mit der grossen Sanierung zu beginnen, so muss er bis dann aus dem Wege geräumt sein, denn wir werden nur in der Lage sein, grosse Werke zu verwirklichen, wenn die Stadt den Umbau übersteht. Mit andern Worten: Wenn wir Grossbaustellen im dichtest überbauten Gebiet einrichten wollen, müssen wir sie so gestalten, dass wirtschaftlich gebaut werden kann. Wir müssen den Verkehr in ihrem Bereich sperren oder umleiten können, wir müssen aber auch einen beträchtlichen Baustellenverkehr zusätzlich zum vorhandenen aufnehmen und bewältigen. Dementsprechend ist das Sofortprogramm als Voroperation zu betrachten, der sich der Patient zu unterziehen hat, damit er die Hauptoperation überhaupt überleben kann. Das Bewusstsein muss gefördert werden, dass das Sofortprogramm keine Notlösung, sondern die Voraussetzung für die grosse Sanierung ist. Hierüber muss das Volk innerhalb und ausserhalb unserer Stadt sachlich aufgeklärt werden.

Dafür, dass ich diese vier grossen und so schweren Brocken hier deponieren durfte, bin ich zu Dank verpflichtet. Mir wird's leichter ums Gemüt, wenn ich die Gewissheit gewinne, dass ich sie an der richtigen Stelle abgelegt habe, wo man gewillt ist, feste Steine aus ihnen herauszumeisseln, mit denen die Zukunft Zürichs gemauert werden kann.

Adresse des Verfassers: Hans Marti, Dipl. Arch., Malvenstrasse 24, 8057 Zürich.

DK 624.131.37

Ein Beitrag zur neuzeitlichen Bodenuntersuchung

Der Triax «3000» der Kraftwerke Mattmark AG

W. Jegher, Herausgeber der Schweizerischen Bauzeitung, zum 65. Geburtstag gewidmet von Dr. Ing. B. Gilg, Elektro-Watt, Zürich

1. Einleitung

Seit der Erscheinung des grundlegenden Werkes von *Karl Terzaghi*, «Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage», sind nunmehr genau 40 Jahre verflossen. In dieser technisch sehr fruchtbaren Zeit hat sich das Formelwerk der Erdbaumechanik soweit entwickelt, dass heute die theoretische Behandlung der Probleme weitgehend als abgeschlossen angesehen werden kann. Um diese vielleicht etwas unerwartete Behauptung ins rechte Licht zu rücken, muss sofort ergänzt werden, dass im Gebiete der praktischen Untersuchung allerdings noch viel zu tun übrigbleibt.

Es gibt wohl kaum einen Zweig des Bauwesens, in welchem die Grenzen der Theorie so augenfällig sind, wie gerade die Bodenforschung – handle es sich nun bei diesem Boden um Lockergestein, um Fels oder um ein nicht genau definierbares Zwischenstadium. Das ist weiter auch nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, wie heterogen die Erdkruste in allen ihren Teilen aufgebaut ist. Sie ist eben ein natürliches Gebilde und unterscheidet sich deshalb in den meisten

Fällen grundlegend von künstlichen Baustoffen wie Stahl, Aluminium, Beton oder Kunstharz, obgleich auch diese Stoffe nicht frei von Heterogenität sind. Eine Ausnahme machen wohl gewisse auf eine grosse Höhe gleichmässig abgelagerte noch lockere oder bereits verfeste feinkörnige Sedimente, die seit ihrer Entstehung an Ort und Stelle verblieben sind, oder magmatische Gesteine ohne innere Spannungen und Klüftung. Aber solche Fälle sind äusserst selten.

Natürlich ist die experimentelle Bodenuntersuchung mindestens so alt wie die theoretische; aber es muss doch festgehalten werden, dass sie in Anbetracht der gewichtigen Bauwerke wie Staumauern und Staudämme, Brückenpfeiler und Wolkenkratzer, welche wir heute bisweilen auf einen eher mittelmässigen Untergrund abstellen, mit der Entwicklung nicht immer Schritt hält. Es wäre sonst kaum erklärlich, dass anlässlich der Gerichtsverhandlungen über die Katastrophe von Fréjus von verschiedener Seite behauptet wurde, die Vorgänge im Felswiderlager hätten sich vollkommen der menschlichen Erkenntnis entzogen, während doch sicher über die Betonfestigkeit der Staumauer zahlreiche Prüfresultate vorlagen.

2. Ziel der Bodenuntersuchungen

Die Festigkeit von Metallen, Beton und Bausteinen prüft man im allgemeinen an relativ kleinen Probestücken. Doch ist man in jüngster Zeit auch dazu übergegangen, eigentliche Träger oder sogar ganze Bauwerke – wir denken an die Brücke von Opfikon – bis zum Bruch zu beladen.

Wenn also bei künstlichen Baustoffen der grosse Masstab angemessen scheint, wieviel mehr beim natürlichen Gesteinsmaterial. Denn hier können die üblicherweise verwendeten kleinen Proben höchstens bei sehr feinkörnigen Materialien einen einigermassen repräsentativen Wert liefern, und auch da nur gerade für diejenige Fundationsschicht, welche aus dem entsprechenden Material gebildet ist. Es ergeht deshalb heute der Ruf nach grosszügigeren Testverfahren, die natürlich vor allem einmal wesentlich grössere Installationen erfordern. In der Felsmechanik ist übrigens diese Erkenntnis schon seit der eigentlichen Begründung dieser Wissenschaft vor etwa zehn Jahren Allgemeingut geworden. Es werden daher in eigens ausgeborenen Stollen und Felskammern Belastungsversuche auf grosse Flächen und Abscherversuche ganzer Felsquader von mehreren Kubikmetern Inhalt vorgenommen; denn kein ernsthafter Ingenieur würde aus dem Druckversuch an einer wenige Zentimeter messenden Gesteinsprobe auf die Festigkeit eines ganzen Gebirges schliessen wollen.

So steht also das triaxiale Schergerät von Mattmark mit in der Reihe derjenigen Apparate, welche nunmehr eine zuverlässigeren Erfassung der Bodeneigenschaften ermöglichen sollen. Wenn es auch heute – jedenfalls diesseits des Atlantik – eines der grössten seiner

Art ist, so dass die Erdproben nicht nur aus Europa, sondern auch aus dem Orient herangeführt werden, so will dies noch lange nicht heissen, dass keine Vergrösserung des Massstabes mehr angezeigt sei. Die bodenmechanischen Prüfgeräte müssen fähig sein, Probekörper zu testen, deren Abmessungen einen direkten Vergleich mit den Vorgängen in der Natur erlauben und vor allem nicht die stets störende Reduktion des Maximalkornes verlangen. Es muss auch möglich sein, *geschichtete Ablagerungen* nachzuahmen und zu überprüfen, sowohl in bezug auf ihre Festigkeit als auch auf andere Eigenschaften wie Durchlässigkeit und Verformungsmodul. Deshalb ist damit zu rechnen, dass in den nächsten Jahren die Nachfrage nach grossen Erdbaugeräten steigt, so dass vielleicht irgendwo in Europa ein Laboratorium mit speziellen Installationen für grosszügige Testmethoden eingerichtet werden sollte.

3. Der Triax «3000» und seine Anwendung

Bild 1 gibt schematisch das ganze Gerät samt seinen Nebeninstallationen wieder. Es wurde gemeinsam von den Firmen Elektro-Watt-AG, Zürich, und Jenny-Pressen AG, Frauenfeld, erstellt und ermöglicht in erster Linie die Bestimmung der Scherparameter, d. h. des Winkels der inneren Reibung φ , der Kohäsion c und des Porenwasser-Spannungskoeffizienten B , in zweiter Linie auch der übrigen Materialbeiwerte wie Raumgewicht γ_e , Durchlässigkeit k und Verformungsmodul M_E .

Die Arbeitsweise ist die folgende: Eine zylindrische Erdprobe von 360 l Inhalt, d. h. von 62 cm Durchmesser und 120 cm Höhe, deren Maximalkorn 80 mm Durchmesser aufweisen kann, wird in einen

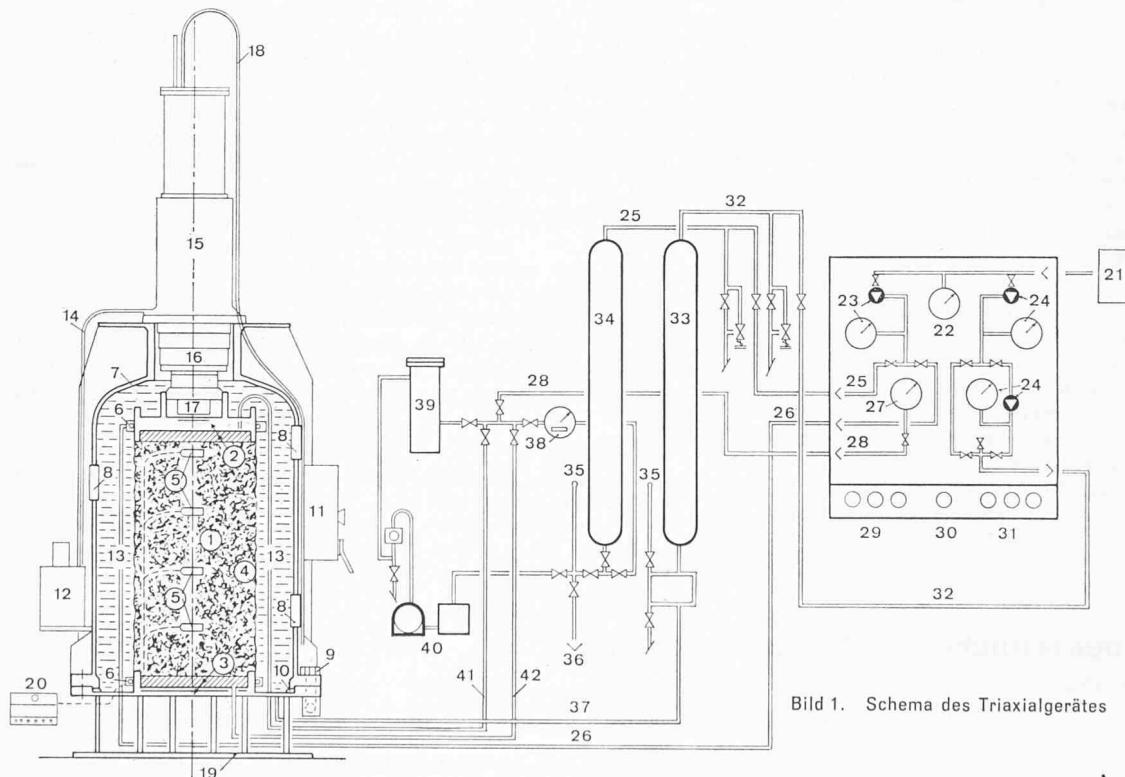


Bild 1. Schema des Triaxialgerätes

- | | | |
|---|---|--|
| 1 Bodenprobe | 16 Presskolben mit 400 mm totalem Vorschub (Δh) | 29 Bedienungsknöpfe der Vakuumpumpe |
| 2 Obere Druckplatte mit eingebauter Filterplatte | 17 Druckdose «System Huggenberger» für Messung der Vertikallast P | 30 Kontrolllicht des Kompressors |
| 3 Untere Druckplatte mit eingebauter Filterplatte | 18 Kolbenweganzeigevorrichtung für Messung von Δh | 31 Bedienungsknöpfe der Oelpresse |
| 4 Gummimantel | 19 Grundplatte | 32 Druckluftleitung zur Vorlage I |
| 5 Maihak-Porenwasserdruckgeber | 20 Maihak-Ablesegerät | 33 Wasservorlage I für Druckglocke: Messung der Volumenänderung ΔV |
| 6 Dichtungsschlauch mit Schutzring | 21 Kompressor und Windkessel | 34 Wasservorlage II für Pumpe: Messung der Sättigungswässermenge und des Konsolidationsausflusses sowie des Ausflusses beim drainierten Druckversuch |
| 7 Druckglocke | 22 Windkesseldruckmanometer | 35 Wasserzufluss |
| 8 Schaugläser | 23 Einstufiges Druckreduzierventil mit Manometer für Dichtungsschläuche und Sättigung | 36 Kühlwasser für Presse |
| 9 Befestigungsschrauben | 24 Zweistufiges Druckreduzierventil mit Manometer für Druckglocke | 37 Wasserleitung zur Druckglocke |
| 10 Dichtungsring | 25 Druckluftleitung zur Vorlage II | 38 Wasser-Volumenzähler |
| 11 Steuertableau der Oeldruckpresse | 26 Druckluftleitung zu den Dichtungsschläuchen | 39 Wasserabscheider |
| 12 Oelreservoir mit Pumpe | 27 Vakuum-Manometer | 40 Vakuumpumpe |
| 13 Glockenwasser | 28 Leitung für Vakumanzeige | 41 Leitung zur oberen Druckplatte |
| 14 Oelleitung zur Presse | | 42 Leitung zur unteren Druckplatte |
| 15 Oelpresse | | |

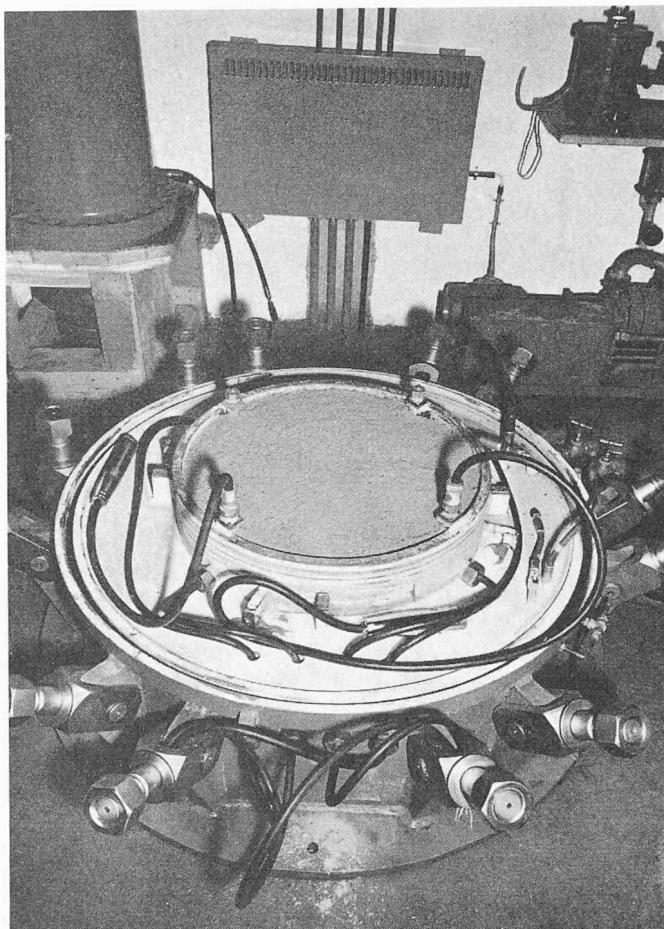


Bild 2. Sockel mit unterer Druckplatte und Filterplatte. Filterschicht eingebaut. Kabel für Maihak-Messzellen angeschlossen

doppelten Gummimantel von $2 + 3$ mm Stärke eingefüllt, welcher aus Gründen der Stabilität vorübergehend von einem Stahlzylinder umschlossen wird. Die Probe wird in aufeinanderfolgenden Lagen von 5 bis 10 cm Stärke eingebracht und soweit festgestampft, dass entweder das im Boden gemessene natürliche oder ein mittelst künstlicher Verdichtung in der Dammschüttung erzeugtes Raumgewicht erhalten wird. Es gelingt allerdings selten, mehr als 95 % des nach Proctor Standart bestimmten Raumgewichtes zu erreichen. Vor Beginn des Einfüllens muss der Gummimantel um die untere Druckplatte und die darin eingelagerte Filterplatte gelegt und diese mit einer 3 cm dicken Sandschicht von der Körnung 1 bis 3 mm überdeckt werden, damit sie während des Versuches von den Steinen der Probe nicht verletzt und vom Feinanteil nicht verstopft wird. Die Filterplatte besitzt eine Durchlässigkeit von 10^{-2} cm/s. Vor dem Auflegen der oberen Druck- und Filterplatte wird die Probe mit einer eben solchen Sandschicht abgedeckt. Im Innern der Probe werden bis zu vier Maihak-Porenwasserzellen verlegt. Durch Anpressen des Gummimantels an die obere und die untere Druckplatte mittels zweier Gummischläuche wird die Probe wasserdicht abgeschlossen.

Nunmehr wird das Innere der Probe durch Unterdruck evakuiert und der Stahlzylinder entfernt. Dann bringt man um den Gummimantel in drei verschiedenen Höhen Dehnungsbänder an, welche während des Versuches das Ausbauchen der Probe zu messen erlauben. Daraufhin wird die Druckglocke, deren Innendurchmesser 102 cm beträgt, aufgesetzt und mit der Grundplatte verschraubt. Zwischen Probe und Glockenwand befindet sich ein freier Raum von rd. 20 cm. Die Plexiglasfenster erlauben ein Beobachten der Probe während des Versuches sowie das Ablesen der Skalen an den Dehnungsbändern. Nach dem Aufsetzen der Ölresse wird die Druckglocke mit Wasser von 1 atü Druck gefüllt. Unter diesem Seitendruck ist die Probe in jedem Fall stabil und kann somit wieder mit Luft gefüllt werden.

Die bisher beschriebenen Vorarbeiten dauern ungefähr einen Tag. Die beiden weiteren Operationen, nämlich die Sättigung und die Konsolidation, werden je nach Versuchsanordnung vorgenommen. Soll zum Beispiel eine Dammschüttung auf ihre Stabilität bei Bauende, also vor dem Einstau überprüft werden, so wird konsolidiert, aber

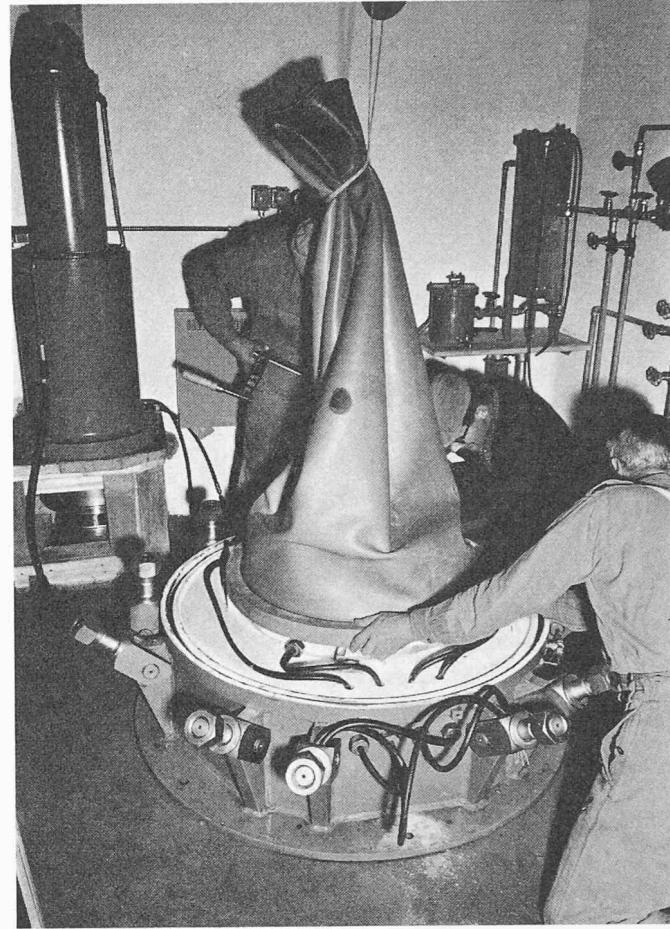


Bild 3. Der Gummimantel wird an der unteren Druckplatte befestigt

nicht gesättigt. Soll die Stabilität nach erfolgtem Einstau oder nach rascher Absenkung nachgewiesen werden, so wird vorerst konsolidiert und dann gesättigt, falls es sich um Kernmaterial oder um Material wasserseitig des Kerns handelt. Soll schliesslich ein Boden untersucht werden, welcher schon vor Baubeginn unter dem Grundwasserspiegel liegt, so wird erst gesättigt und dann konsolidiert.

Die Sättigung geht so vor sich, dass man von der unteren Filterplatte her Wasser einpumpt, bis dieses bei der oberen Filterplatte wieder austritt. Die Menge des zugeführten Wassers kann dabei in der Wasservorlage II gemessen werden. Je nach der Dichtigkeit der Probe dauert der Sättigungsvorgang 15 Minuten bis mehrere Tage; praktisch ist allerdings wegen der eingeschlossenen Luft eine Sättigung über 80 % gar nicht möglich. Nimmt das Volumen der Probe durch die Sättigung zu, so lässt sich dies durch die Wasserverdrängung aus der Druckglocke bestimmen, welche in der Wasservorlage I festzustellen ist.

Die Konsolidation der Probe erfolgt durch allmähliche Steigerung des Wasserdrukkes in der Glocke bis zu demjenigen Seitendruck σ_{III} , welcher für den Abpressversuch vorgesehen ist, wobei das Probeninnere entwässert oder abgeschlossen werden kann. Die Druckglocke gestattet ohne weiteres Seitendrücke bis zu 5 atü. Sollte dieser Wert dem Leser etwas niedrig erscheinen, so ist zu bedenken, dass bereits bei einem relativ niedrigen Reibungswinkel von 30° dem Seitendruck von 5 kg/cm^2 eine vertikale Bruchspannung von 15 kg/cm^2 entspricht. Es werden also Zustände in einer Tiefe von rd. 80 m unter der Oberfläche erfasst, was im allgemeinen genügt, da die für die Sicherheit massgebenden Gleitkreise einer Böschung meist viel weniger tief in die Schüttung oder in den Untergrund reichen.

Ist der Konsolidationsdruck erreicht, so werden die aus der Probe (aus den Filterplatten) führenden Leitungen in jedem Fall geöffnet, so dass das unter Druck geratene Porenwasser entweichen kann. Die Konsolidation gilt als abgeschlossen, sobald kein Wasser mehr austritt. Sie kann je nach Material einige Minuten bis mehrere Tage dauern.

Nach diesen Prozeduren ist die Erdprobe für das Abpressen vorbereitet. Der Vertikaldruck wird nun mittels stufenweiser Stei-

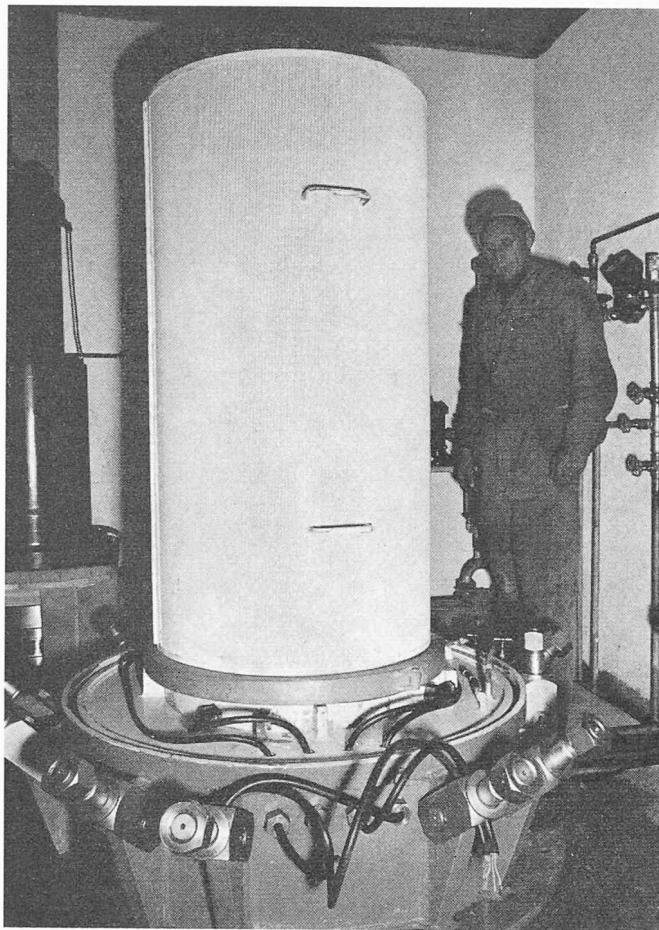


Bild 4. Die Probe ist eingefüllt und wird noch durch den Stahlzylinder gehalten

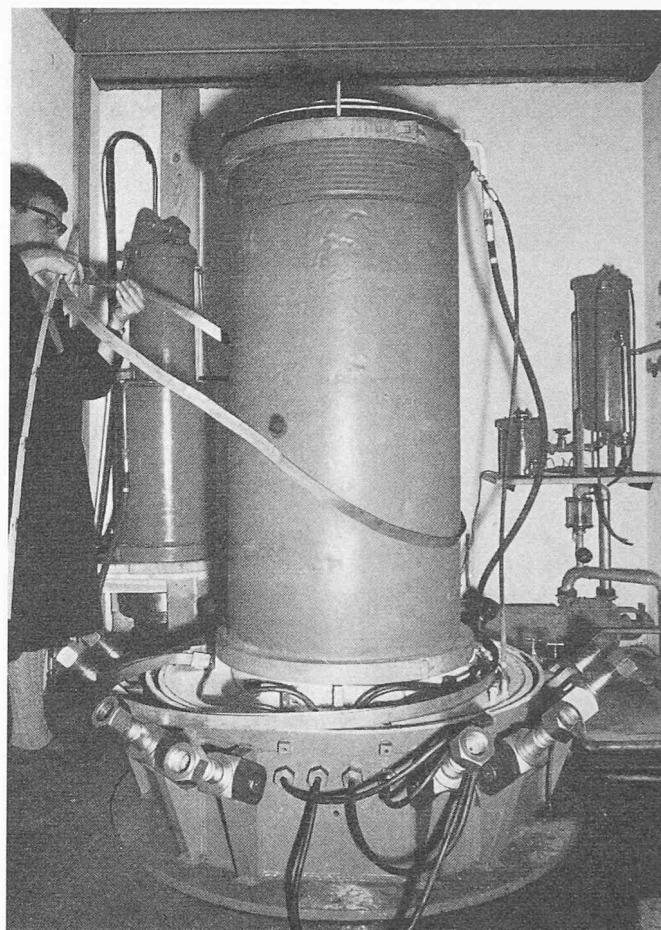
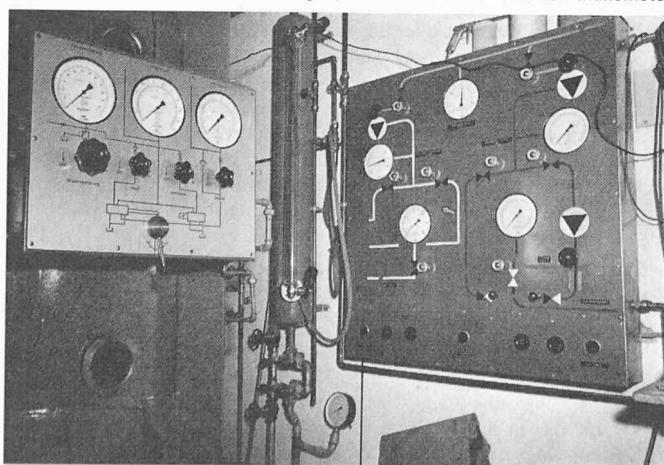


Bild 5. Der Stahlzylinder ist von der evakuierten Probe entfernt. Die Dehnungsbänder werden angebracht

gerung des Öldruckes im Zylinder allmählich erhöht, wobei die Stufen so gewählt werden, dass bis zur mutmasslichen Bruchlast 15 bis 20 Etappen zurückzulegen sind. Dabei leitet man eine neue Laststufe in die Wege, sobald die Setzungen für die alte abgeklungen sind. Die maximal mögliche Vertikallastbelastung beträgt 102 t oder 34 kg/cm^2 . Beim Zusammenpressen kann die Zuleitung zu den Filterplatten geöffnet oder geschlossen werden, je nachdem der Versuch drainiert oder undrainiert durchgeführt wird. Für jede Stufe werden folgende Messungen gemacht:

Einsenkung der Probe	Δh
Querschnittsveränderung im oberen Viertel	ΔF_o
Querschnittsveränderung in der Mitte	ΔF_m
Querschnittsveränderung im unteren Viertel	ΔF_u
Ausgepresstes Porenwasser beim drainierten Versuch	u
Porenwasserspannung	

Bild 8. Uebersicht über die Steueranlage: links das Tableau der Presse, in der Mitte eine der Wasservorlagen, rechts die verschiedenen Manometer



Volumenänderung der Probe

$$\Delta V$$

In Funktion der Vertikallast P werden folgende Werte aufgetragen:

Vertikalspannung	$\sigma_I = P/F_m$ in kg/cm^2
Spezifische Einsenkung	$\Delta h/h_0$ in % ($h_0 = h$ zur Zeit $t = 0$)
Volumenvergrösserung	$\Delta V/V_0$ in % ($V_0 = V$ zur Zeit $t = 0$)
Porenwasserspannung	u in kg/cm^2
Porenwasserkoeffizient	$\bar{B} = u/\sigma_I$ in %

Die Vertikallast selber wird mittels des Öldruckes im Zylinder sowie mittels einer Druckdose «System Huggenberger» gemessen.

4. Interpretation der Resultate

Der Zweck des Versuches besteht darin, für verschiedene Seitendrücke diejenige Vertikalspannung σ_I zu bestimmen, welche den Bruch herbeiführt, und daraufhin die Scherfestigkeit s in Funktion der effektiven Normalspannung σ_n aufzutragen. Es sollten für ein Material mindestens drei Bruchversuche durchgeführt werden, wobei der Bruch wie folgt definiert wird: *Im Augenblick, wo die Vertikalspannung σ_I ihr Maximum erreicht hat, findet der Bruch statt.*

Man wird sich im ersten Augenblick fragen, wie es denn möglich ist, dass die Vertikalspannung ihr Maximum überschreitet und wieder abnimmt. Dies tritt dann ein, wenn die Probe sich so stark verformt, dass die Querschnittsfläche F_m infolge der Ausbauchung stärker zunimmt als die Belastung P . Allerdings kommt es auch vor, dass σ_I nur noch ganz schwach zunimmt oder konstant bleibt. Auch dieser Zustand wird dann als Bruch bezeichnet.

Ist nun der Augenblick des Bruches festgestellt, so werden die dazu gehörigen Hauptspannungen σ_I und σ_{III} sowie die Porenwasserspannung u notiert und die beiden Hauptwerte $\sigma_I - u$ und $\sigma_{III} - u$ zur Konstruktion eines Mohrschen Kreises verwendet. Aus mindestens drei Mohrschen Kreisen, bei welchen σ_{III} von 1 bis 5 kg/cm^2 variiert, kann man bereits mit ziemlicher Sicherheit die sogenannte Umhüllende als Tangentenkurve bestimmen. Für die Umhüllende gibt es drei Möglichkeiten:

- Sie ist eine Gerade durch den Nullpunkt: Dieser Fall dürfte schon wegen der jeder Messung anhaftenden Fehler kaum auftreten,

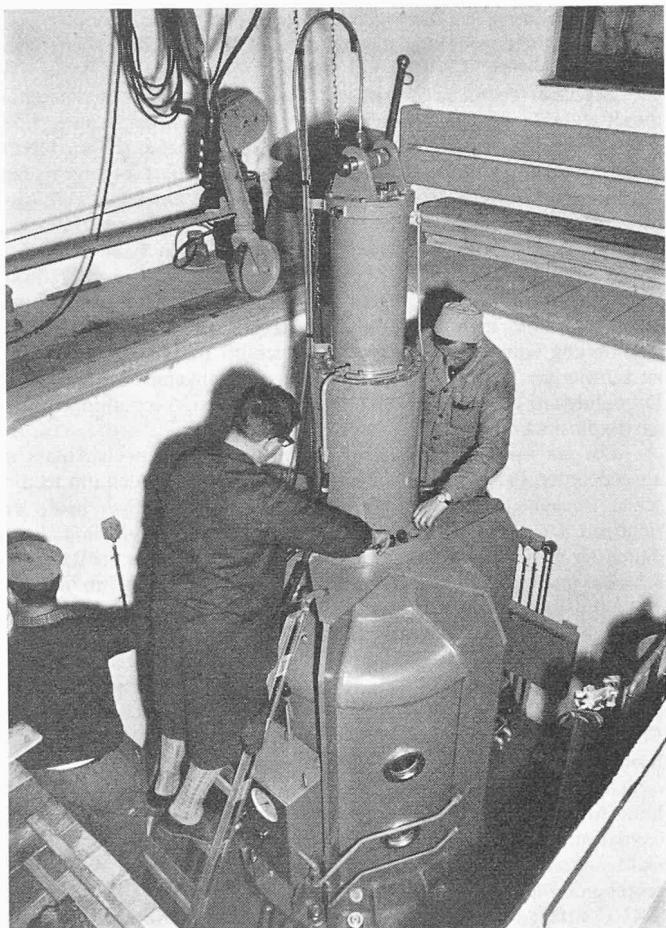


Bild 6. Der Kolben wird auf der Druckglocke aufgeschraubt

kann aber praktisch sehr weitgehend erfüllt sein. Das Material besitzt somit keine innere Kohäsion, sondern nur eine dem Überlagerungsdruck σ_n direkt proportionale Scherfestigkeit; der Neigungswinkel der Geraden wird als Winkel der inneren Reibung bezeichnet. Das Gesetz für die Scherfestigkeit s heisst in diesem Fall

$$s = \tan \varphi \cdot \sigma_n$$

Solche Geraden kommen vor allem bei nicht bindigen, möglichst rundkörnigen Materialien wie Sanden und Fluss-Schottern vor.

b) Die Umhüllende ist eine Gerade, welche die τ -Axe oberhalb des Nullpunktes schneidet. Das Gesetz für die Scherfestigkeit lautet dann

$$s = c + \tan \varphi \cdot \sigma_n, \quad \text{wobei } c \text{ die bereits ohne Überlagerungsdruck auftretende Scher-}$$

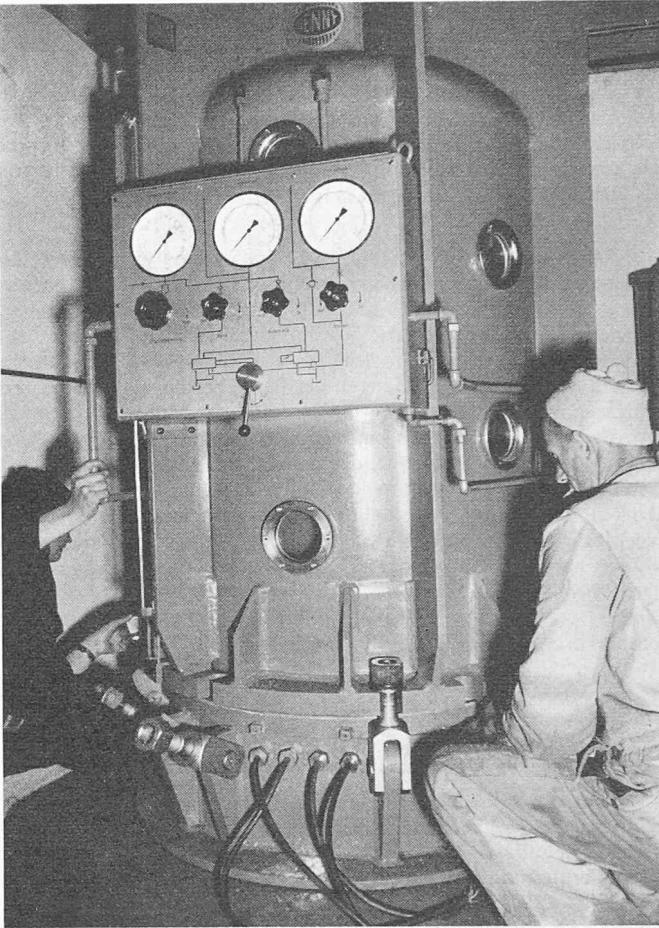


Bild 7. Steuertableau der Oeldruckpresse auf dem zum Versuch bereiten Triaxialgerät

festigkeit, d. h. also die innere Kohäsion bedeutet. Dieses Gesetz ist bei bindigen Materialien üblich, kann aber auch bei kantigen Kies-sanden auftreten; die Kohäsion ist dann meist durch die Verkeilung der Körner bedingt, sie ist ein sogenanntes Interlocking.

c) Der häufigste Fall ist aber ein nicht proportionales Gesetz, wobei die Scherfestigkeit als Kurve dargestellt werden muss. Es existiert sodann weder eine eigentliche Kohäsion noch ein Winkel der inneren Reibung mehr, es sei denn, diese beiden Größen werden als Näherungswerte für einen beschränkten Kurvenabschnitt angegeben.

Ist die Scherfestigkeit in Funktion der effektiven Normalspannung bestimmt, so kann sie in eine der üblichen Formeln für die Gleitkreisberechnung eingesetzt werden. Natürlich muss der Überlagerungsdruck unter Berücksichtigung der zu erwartenden Porenwasserspannung als eigentlicher Korn-zu-Korn-Druck berechnet werden.

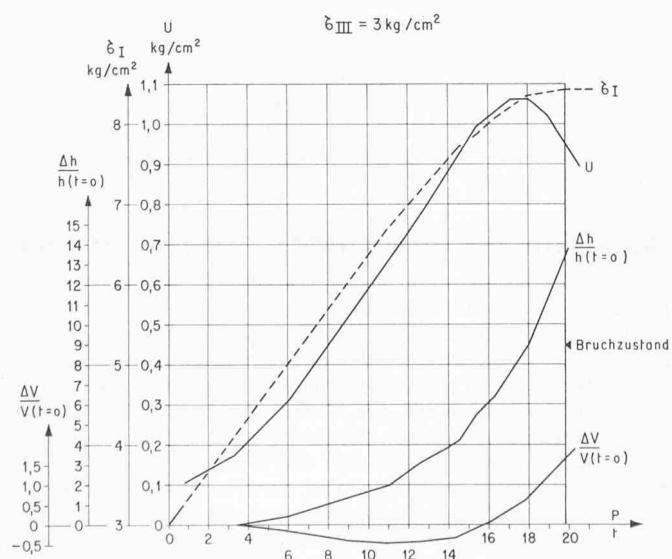


Bild 9a. Aufzeichnung eines Druckversuches mit Material vom Untergrund des Mattmarkdammes

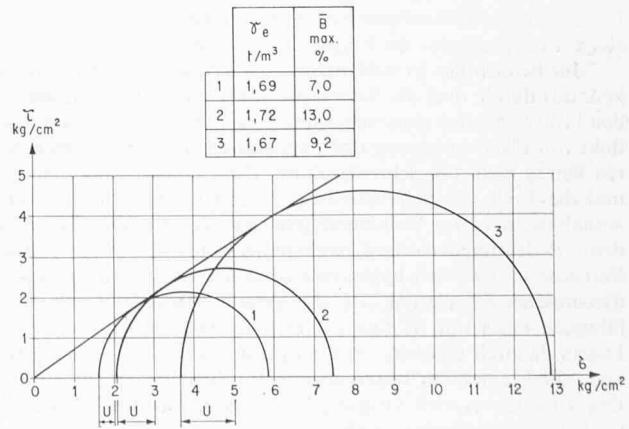


Bild 9b. Konstruktion der Scherfestigkeitskurve aus 3 Mohrschen Kreisen. Der Versuch links liegt dem Kreis 2 zugrunde

Dieses Vorgehen erlaubt, die Stabilität von Böschungen und Fundationen mit Hilfe der effektiven Spannungen zu berechnen. Die Berechnungsmethode mit totalen Spannungen, welche eigentlich mangels Kenntnis der Porenwasserspannungen eingeführt wurde, sollte auch bei sehr feinkörnigen Materialien möglichst bald verschwinden. Denn sie basiert auf einer Kombination von zwei fehlerhaften Annahmen, welche sich nicht unbedingt gegenseitig korrigieren. Es kann sich ohne weiteres ein beträchtlicher Fehler ergeben.

5. Schlussbetrachtung

Das Triaxialgerät «3000», so genannt wegen seiner 3000 cm^2 messenden Querschnittsfläche, wurde von der Kraftwerke Mattmark AG in grosszügiger Weise für den Bau des Staudamms Mattmark angeschafft. Die Gesellschaft übernimmt aber auch Aufträge von anderer Seite, sei es aus der Schweiz oder aus dem Ausland. Bereits wurden mehrere Tonnen Material per Bahn, per Schiff und sogar per Flugzeug nach dem Saastal verbracht und getestet.

Es ist dem Verfasser eine angenehme Pflicht, den Bauherrn wegen seiner modernen Einstellung gegenüber den Problemen der Erdbaumekanik zu beglückwünschen und ihm für seine Unterstützung zu danken. Er dankt aber auch allen seinen Herren Kollegen, welche zur Verwirklichung der Prüfanlage beigetragen oder in ihr Versuche ausgeführt haben, insbesondere den Diplomingenieuren Roth, Amsler und Dr. Schetelig. Ein besonderer Dank gebührt ferner Herrn dipl. Ing. Amberg von der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau für seine oftmals erteilten nützlichen Ratschläge.

Adresse des Verfassers: Dr. B. Gilg, dipl. Ing., c/o Elektro-Watt, Talacker 16, 8001 Zürich

Schmieren und Schmiermittel

«Schmieren ist ein dynamischer Vorgang, der zwischen zwei relativ zueinander bewegten Körpern Kräfte übertragen und Reibung verhindern soll.» Diese einfache Definition des komplexen Begriffes «Schmierung» umfasst eine ganze Reihe von Phänomenen, wie sie überall in der Technik auftreten und heute speziell bei der Raumschiffahrt eine wichtige Rolle spielen.

Der Forscher interessiert sich lebhaft für den Mechanismus des Verschleisses, wie er bei Kontakt von Reibungspartnern als mechanisches, thermisches oder elektrisches Phänomen auftritt. Gerade im Gebiet der trockenen Reibung steht eine Neuerorientierung der Wissenschaft bevor. Die hydrodynamische Vollschmierung mit flüssigen oder gasförmigen Medien (organische Stoffe, flüssige Metalle, Salzschmelzen, Luft) schaltet den Reibungsverschleiss praktisch aus. Dieser Idealzustand ist aber sehr oft nicht verwirklicht. An- und Auslauf von Maschinen sowie stossartige Belastungen bringen Reibungsverschleiss mit sich. Allein in Deutschland wird der dadurch angerichtete Schaden auf jährlich 6 Mrd DM geschätzt. Diese Zahl erhellt die Wichtigkeit des Problems.

Bis jetzt wurde zu wenig beachtet, dass sich die in Kontakt kommenden Rauhigkeiten elastisch und plastisch verformen, wobei Reibungswärme entsteht. Der Einfluss des Milieus (Gas, Flüssigkeit, Feststoff) auf die Metalloberfläche steht damit in engem Zusammenhang, wie auch Lösungsmittel auf Metalloberflächen, beispielsweise auf Aluminium, Beryllium, Molybdän, zu einer Änderung der Duktilität führen können. Die Entfernung dieser Oberflächenschichten sowie von Mikrorissen, etwa durch das Verfahren des Elektropolierens, steigert die Bruchfestigkeit in gewissen Fällen um ein Mehrfaches. Das Eindiffundieren von Silber in die Oberfläche von Kupfer steigert beispielsweise die Fließgrenze um rd. 50%.

Im Bereich der hydrodynamischen Schmierung setzt sich die Erkenntnis durch, dass die Bemessung von Gleitlagern nicht mehr nach den bisher üblichen Kriterien erfolgen soll, die besagen, dass das Produkt von Flächenpressung mal Zapfengeschwindigkeit einen bestimmten Betrag nicht überschreiten dürfe. Die Geometrie der Gleitflächen und die Rolle des Schmiermittels werden dabei vernachlässigt. Die Annahme, dass bei Vollschmierung der Werkstoffpaarung entscheidende Bedeutung zukommt, ist ebenfalls nicht mehr aufrecht zu halten. Versuche in den USA haben eine neue Art von sog. magneto-hydrodynamischer Schmierung zum Ziel gehabt. Dabei lässt sich die Tragfähigkeit eines mit flüssigem Metall hydrodynamisch geschmierten Lagers dadurch erhöhen, dass ein Strom durch das Metall geschickt und mittels eines von aussen angelegten Magnetfeldes ein zusätzlicher Druck aufgebaut wird. Grosse Effekte lassen sich dabei durch supraleitende Elektromagnete erreichen.

Damit ein Gas hydrodynamisch schmierwirksam ist, muss man einen oder mehrere Staupunkte bilden. Die Luftkissenfahrzeuge sind

eine Entwicklung, die dieses Prinzip des Staupunktes ausnutzen. Es sind Typen in Erprobung, die bis zu 2 m hohe Wellen überwinden können.

Bei den *Hydraulikölen* ist man auf grössere Betriebssicherheit durch Herabsetzung der Brennbarkeit bedacht. Die Umstellung eines hydraulischen Systems von einem Mineralöl oder einer schwer brennenden Flüssigkeit auf ein anderes Betriebsmittel bedarf im allgemeinen sehr sorgfältiger Abklärungen, um die Einflüsse eines anderen Ausdehnungskoeffizienten, anderer spez. Wärme usw. kennenzulernen. Organische Phosphate haben sich hier in vielen Fällen bewährt.

Bei der Prüfung von *Getriebeölen* scheint sich die Methode der Reibleistungsprüfung nach Niemann durchzusetzen. Die Normung dieser Methode steht bevor in DIN 51 354 (Normenentwurf). Die Schmierung von Kompressoren für Druckluft führt auch heute noch zu schwierigen Problemen. Man strebt ganz allgemein völlig ölfreie Druckluft an, da dann die Gefahr von Bränden, Verpuffungen oder gar Explosionen wesentlich kleiner ist.

Öle für Verbrennungsmotoren geben auch heute noch Anlass zu ausgedehnten Propagandafeldzügen, die immer mehr auch mit technischen Einzelheiten gespickt sind. Zur Diskussion stehen heute die richtigen Ölwechselintervalle. Die Praxis fordert, dass die Lebensdauer der wesentlichen Teile eines Verbrennungsmotors, die dem Verschleiss unterworfen sind, im Automobil für Europa mindestens 100000 km betrage. Die Empfehlungen der Motorhersteller der Benzinkmotoren geben die Ölwechselintervalle für 1964 mit durchschnittlich 5000 km an. Wesentlich bleibt der Verschleissbefund am Motor. Ob sich diese als «long-distance-Öle» angepriesenen Schmieröle auch für Dieselmotoren gleich gut eignen, bleibt noch abzuwarten. Für die Prüfung von Motorenölen gibt es noch keinen Kurztest. Bestes Kriterium ist immer noch der Fahrversuch.

An die *Schmieröle von Düsenflugzeugen* werden ausserordentlich hohe Anforderungen gestellt. So muss etwa ein solches Öl bis 260°C oxydationsbeständig sein; es darf bei diesen Temperaturen Metall nicht angreifen und der Verdampfungsverlust darf 5% nicht überschreiten. Die Viskosität ist im Betriebsbereich von -54°C bis 204°C strengen Grenzen unterworfen. Obwohl die bisher bekannten Silikonöle stabil gegen Wärme und Kälte sind und kaum korrosiv wirken, schmieren sie schlecht. Anderseits sind viele Fluorkohlenstoffverbindungen gute Schmiermittel, haben aber bei hohen Temperaturen eine zu geringe Viskosität. Es gelang in den Organosiliconfluorestern und ihren Derivaten eine Kombination der Vorteile beider Verbindungen zu erreichen.

Die *Feststoff-Schmiermittel* wie Graphit, Molybdänsulfid, Boritrid u. a. m. befinden sich in voller Entwicklung. Der Mechanismus der Schmierung ist noch nicht geklärt. So zeigt Graphit gute Schmierwirkung bei feuchter Luft, schmiert mässig bei Sauerstoffatmosphäre und versagt in Stickstoffumgebung. Bei Molybdänsulfid ist es gerade umgekehrt. Die Frage der Alterung eines solchen Feststoffschnierfilms wirft ebenfalls Probleme auf. Die Anforderungen der modernen Technik an die Schmierstoffe betreffen auch das Gebiet der Strahlungsresistenz. Da nunmehr in der ganzen Welt 50 Kernkraftwerke in Betrieb sind, sowie deren 23 im Bau stehen, haben die diesbezüglichen Probleme sehr aktuelle Bedeutung. Die Strahlungsresistenz organischer Flüssigkeiten ist weitgehend von ihrer Struktur bestimmt und nimmt in folgender Reihenfolge ab: Polyphenyle – Mineralöle – aromatische Ester – Silikone – aromatische Phosphate.

Das vorliegende Referat ist der «VDI-Zeitschrift» 1965, Bd. 107, Nr. 1, S. 34–39 entnommen, wo auch ein Literaturverzeichnis mit 173 Titeln zu finden ist.

Bemerkungen zum CIMAC 1965

Vom 25. bis 29. April fanden sich etwa 700 Ingenieure aus 31 Ländern zum 7. CIMAC (Congrès international des machines à combustion) in London ein. Das Hauptthema lautete: «Technische Probleme stark belasteter Dieselmotoren (mittlerer effektiver Kolbendruck über 11,5 bar bei 4-Takt-Motoren, über 8,5 bar bei 2-Takt-Motoren), sowie Probleme der Gasturbinen, herrührend von den hohen Temperaturen und der Brennstoffqualität».

CIMAC als Institution besteht seit 1950 und führt in zwei- bis dreijährigem Turnus solche Tagungen durch¹⁾. Daneben hat sich der permanente Ausschuss weiteren Aufgaben zugewandt, so der Normung auf dem Gebiete der Dieselmotoren und Gasturbinen. Dies ist sehr zu begrüßen. So wäre es zum Beispiel nützlich, den Begriff

¹⁾ 1957 in Zürich (SBZ 1957, H. 24, S. 361–392); 1959 in Wiesbaden, 1962 in Kopenhagen.