

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 113/114 (1939)
Heft: 21

Artikel: Die hydraulischen Maschinen des vierten Ausbaues
Autor: Hablützel, Emil
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-50612>

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: 22.02.2026

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

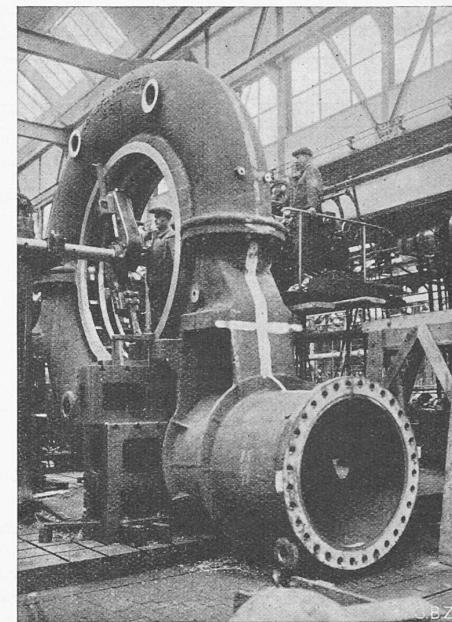
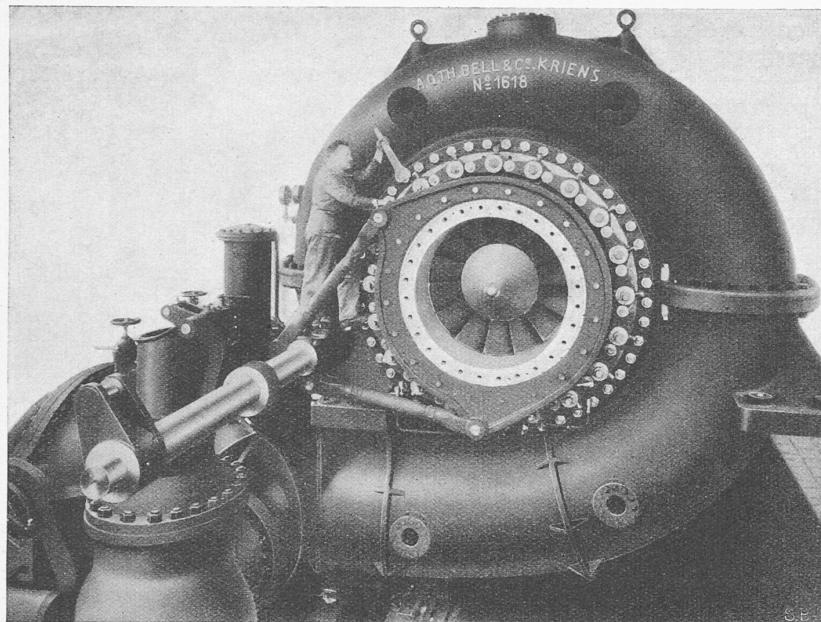


Abb. 18. 22500 PS-Spiral-Francis-Turbine der Zentrale Unteraa der C. K. W. — A. G. Th. Bell & Cie., Kriens. — Abb. 19. Ausbohren des Spiralgehäuses

wird. Der Vergleich mit Abb. 12 mit den Hebungen und Senkungen der Fixpunkte im künstlichen Deltaschuttkegel des Versuchsbassin zeigt für Versuch und Wirklichkeit den gleichen Charakter der Senkungstendenz.

Schlussfolgerungen

1. Die eingehenden Untersuchungen am Lungernsee über die Bewegungen der Ufer infolge Staubauftriebs ergaben wertvolle Erkenntnisse in Bezug auf die Abhängigkeit zwischen Seespiegel-Schwankung und Grösse der Fixpunktbewegungen.

2. Es ist gelungen, die Beziehung zwischen der Art des Staubauftriebs und der damit zusammenhängenden Art der Fixpunktbewegungen mathematisch zu erfassen.

3. Mit Sicherheit ist vorauszusagen, dass mit der Zeit die Grösse der jährlichen Bewegung der Fixpunkte abnimmt und dem Endwert null entgegenstrebt.

4. Die Versuche im Prüfraum und die Wirklichkeit ergaben gute Uebereinstimmung über die Art der Senkungstendenz eines Bachschuttkegels, der im Bereich eines Stausees mit stark schwankender Stauamplitude liegt.

Die hydraulischen Maschinen des vierten Ausbaues

Die Zentrale bei Kaiserstuhl. Vom seeseitigen Ende des Melchaa-Stollens, das als Wasserschloss ausgebildet wurde, beträgt das Gefälle bis zum See je nach Stand des Staues $115 \div 119$ m und die verfügbare Wassermenge max. rd. 10 000 l/sec. Wegen der starken Schwankungen des Seespiegels muss das Abwasser der in dieser aufgestellten beiden vertikalachsigen Francis-Turbinen (Abb. 15 und 16) von max. 4000, bzw. 10 000 PS nach dem Saugrohr nochmals gefasst werden, bevor es in den See ausfließt. Die grosse Verschiedenheit in der Leistungsfähigkeit der genannten Aggregate ist bedingt durch die stark veränderliche Wasserführung im Melchaa-Stollen. Als ferngesteuertes bedienungloses Kraftwerk stellte es an die Maschinen, Apparate und Sicherheitsvorrichtungen besondere Anforderungen, denen die A. G. Th. Bell & Cie. in Kriens, die neben allen hydraulischen Maschinen auch Absperrorgane und anderes mehr für das gesamte Lungernseewerk lieferte, Rechnung trug. Der Kugelschieber am Einlauf zur Druckleitung wird durch einen Elektromotor geöffnet und durch ein Gewicht geschlossen. Seine Bewegungen werden von der Zentrale Unteraa aus gesteuert. Daneben sind Sicherheitsvorrichtungen vorhanden, die bei Rohrbruch oder sonstwie verursachtem Druckabfall vor den Turbinen die Schliessbewegung einleiten. Zur Vermeidung von Druckstößen in der Leitung wird die Bewegungsgeschwindigkeit der Kugelschieber vor den Turbinen durch besondere Regulatoren überwacht. Das Öffnen dieser Schieber erfolgt durch einen Oelservomotor, während die Schliessbewegung ebenfalls durch ein Schliessgewicht bewirkt wird. Auch diese Absperrorgane werden von der Zentrale Unteraa aus gesteuert.

Weil die Zentrale ohne Bedienung ist, musste vor allem der Schmierung der Turbinen ein besonderes Augenmerk geschenkt

werden. Führungsleiter, Regulierringe und Hebel laufen im Ölbad, und die Leitschaufellager werden automatisch durch eine vom Regulierring aus angetriebene Fettpresse geschmiert. Die Stopfbüchse ist als Labyrinthdichtung ausgebildet. Zur Kühlung der mit Tragsegmenten ausgerüsteten Spurlager wird deren Schmieröl mit einer Umlaufpumpe durch eine Kühlslange gefördert, an die sich ein Filter anschliesst. Diese Umlaufpumpe, sowie die Druckölpumpe zu den Regulatoren und ein kleiner Kompressor für die Schwimmerregulierung werden von einem gemeinsamen Elektromotor mit Zentrifugalanlasser angetrieben. Steigen die Öltemperaturen in den Lagern zu hoch, so werden die Turbinen selbsttätig stillgelegt. Da bei plötzlichem Schließen des Leitapparates die Saugwassersäule abreisst, sodass sich ohne besondere Vorkehrungen im Saugrohr ein Vakuum bilden würde, das ein Zurückschlagen des Wassers zur Folge hätte, wird in diesem Fall von einer Leitschaufel aus ein Lufteinlassventil geöffnet, das sich dann, durch einen Katarakt gebremst, langsam wieder selbsttätig schliesst.

Von einem auf der Generatorwelle sitzenden Pendel aus wird über ein Gestänge mit Federbandgelenken der Steuervolben der Oeldruckregulatoren betätigt. Eine besondere Einrichtung erlaubt, den Ungleichförmigkeitsgrad während des Betriebes von 0 bis 8% zu verstetzen. Die Drehzahlverstellung bzw. Belastungsänderung bei parallel geschalteten Maschinen kann durch einen von der Zentrale Unteraa aus bedienten kleinen Elektro-Motor erfolgen, der durch Endausschalter in den Grenzlagen des Verstellbereiches selbsttätig ausgeschaltet wird. Normalerweise aber wird die Belastung mit Hilfe eines Schwimmers, der ebenfalls über ein Gestänge auf das Regulierventil einwirkt, der verfügbaren Wassermenge angepasst. Mit Hilfe

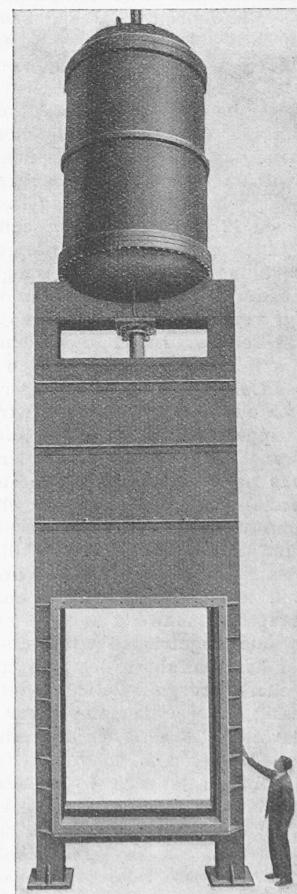


Abb. 17. Gleitschütze $1,80 \times 2,40$ m am Lungernsee mit ferngesteuertem hydraulischem Servomotor A. G. Th. Bell & Cie., Kriens

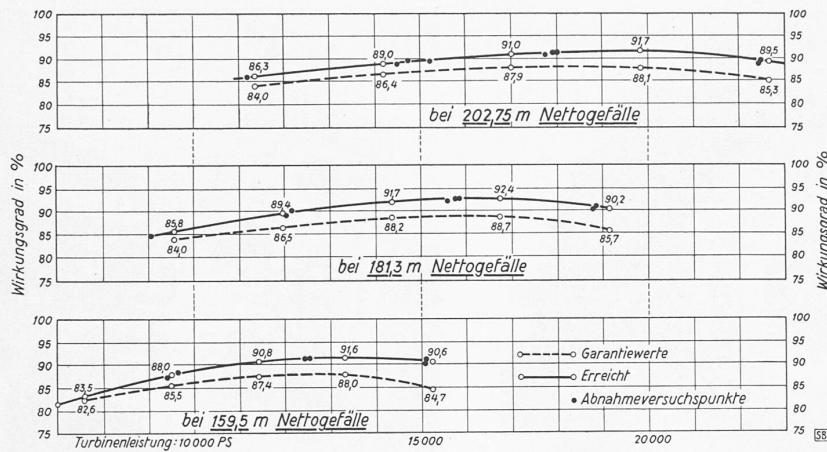


Abb. 21. Wirkungsgrade der 22500 PS-Francis-Turbine der A.G. Th. Bell & Cie., Kriens

einer Druckluft-Leitung können die Niveauschwankungen von einem Behälter neben dem Wasserschloss auf den Schwimmerschacht neben den Turbinen übertragen werden. Ein besonderer Sicherheitsregler bewirkt nicht nur das Schliessen des Leitapparates, das durch Federkraft erfolgt, während das Oeffnen durch den Oeldruck-Servomotor geschieht, sondern auch ein Abstellen der Gruppe von der elektrischen Seite her, wenn die Drehzahl um 30 % über die normale gestiegen ist. Zum Schutz der Druckleitungen vor Druckstößen bei plötzlichem Schliessen der Turbinen sind natürlich auch die üblichen Druckregler angebracht, die vorübergehend das Wasser durch einen Bypass abströmen lassen. Die Qualität der Turbinen wird am besten illustriert durch die Tatsache, dass die bei beiden Turbinen unter Leitung eines neutralen Experten gemessenen Wirkungsgrade durchwegs höher sind als die Garantiewerte und ausserdem die vorübergehenden Drehzahländerungen bei plötzlichen Be- und Entlastungen unter den garantierten Grenzwerten blieben.

Die Erweiterung der Zentrale Unteraa. Der neue Stollen durch den Felsriegel von Kaiserstuhl kann gegen den See durch eine Gleitschütze abgeschlossen werden, deren Abmessungen aus Abb. 17 hervorgehen. Sie wird durch einen hydraulischen Servomotor betätigt, dessen Steuerorgane in einem Apparatehaus am Eingang des Schützenschachtes untergebracht sind. Eine Fernsteuerung ermöglicht das Schliessen der Schütze auch von der Zentrale Unteraa aus. Elastische Verbindungen zwischen der Druckleitung und den Kugelschiebern zu den beiden angeschlossenen 22500 PS-Turbinen schützen die Abschlussorgane vor zusätzlichen Spannungen infolge Dehnungen der Zweigleitungen. Oeffnungs- und Schliessbewegung der Kugelschieber wird durch einen hydraulischen Servomotor bewirkt. Während die Steuerung nur von Hand auf «Oeffnen» gestellt werden kann, lässt sich das Schliessen auch durch einen Magneten einleiten, der durch einen Druckknopf willkürlich betätigt oder aber beim Fehlen des Oeldruckes für den Regler und beim Durchbrennen der Turbine automatisch ausgelöst wird. Wie für die bereits bestehenden Gruppen wurden auch für die beiden neuen horizontalachsigen Francisturbinen mit fliegendem Laufrad gewählt (Abb. 18 u. 19). Das Lager zwischen Turbine und Generator ist als kombiniertes Radial- und Axiallager ausgebildet, in dem der normale Axialschub durch Segmente aufgenommen wird, während ein Wellenbund als Sicherung bei allfälligem vorübergehendem Richtungswechsel des Schubes dient. In das Schmier- und Oelkühlungssystem sind zwei Umlaufpumpen eingebaut, wovon die eine von der Hauptturbine welle und die zweite durch eine kleine Freistrahl-turbine angetrieben wird. Diese ermöglicht die Oelzirkulation vor dem Anfahren der Hauptturbine und dient im weiteren als Sicherheitsorgan. Beim Ausfallen des Oeldruckes und bei unzulässig hoher Lagertemperatur wird der Wärter durch eine Hupe alarmiert. Wie an den Maschinen in Kaiserstuhl sind auch hier Druckregler zum Schutze der Druckleitung und Lufteinlassventile an den Saugrohren zur Vermeidung von Wasserrückschlägen angebracht. Die Generatoren stammen von Brown, Boveri & Cie.

Der Antrieb des Pendels zu den Geschwindigkeitsregulatoren (Abb. 20), die für Vollabschaltungen mit Druckölakkumulator (d.h. Windkessel) ausgerüstet sind, erfolgt durch einen Drehstrom-Asynchronmotor, der von einer kleinen Dynamo, aufgebaut auf der Erregermaschine, gespeist wird. Da die Belastung und damit der Schlußpfeil des Motors klein und konstant ist, läuft er praktisch genau synchron mit der Turbine. Bleibt der Pendelstrom aus, so wird die Turbine selbsttätig abgestellt. Sollte eine Tur-

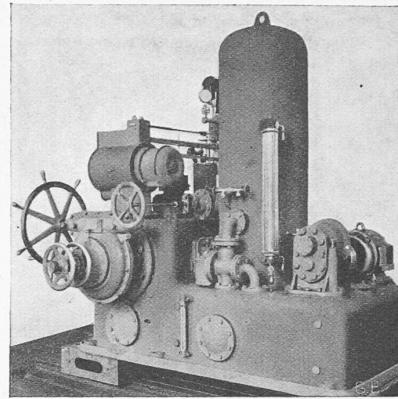


Abb. 20. Oeldruckregler der 22500 PS-Turbinen der erweiterten Zentrale Unteraa des Lungernsee-Kraftwerks der C.K.W.

bine durchbrennen, so bewirkt der Sicherheitsregulator das Schliessen des Leitapparates. Weil beim Fehlen des hierzu erforderlichen Oeldrucks oder bei einer Störung am Leitapparat diese Sicherheit nicht ausreichen würde, wird auch der Kugelschieber vor der Turbine geschlossen. Auch hier sprechen die Messresultate für die Qualität der Maschinen, erreichten sie doch einen max. Wirkungsgrad von 92,4 % gegenüber einer Garantie von 88,7 % (Abb. 21); auch die momentanen Drehzahlenschwankungen bei plötzlichen Belastungsänderungen blieben kleiner als sie nach Garantie hätten sein dürfen. E. Hablützel

Vom Bau des Grossen Melchaa-Stollens

Abschliessend noch eine Ergänzung zum Vollausbau in baulicher Hinsicht. Der *Grosse Melchaa-Stollen*, durch den das Einzugsgebiet des Lungernsees samt Kleiner Melchaa von 64 km^2 auf 120 km^2 vergrössert worden ist, stellt eine tunnelbauliche Höchstleistung dar: mit seiner, im Vergleich zum lichten Ausbruchprofil von nur rd. $5,5 \text{ m}^2$ aussergewöhnlichen Länge von 6500 m, bei rd. 1000 m Ueberlagerung, ist er auf unserm Kontinent der längste bisher von nur zwei Angriffen aus erbohrte Wasser-Stollen (vergleichsweise misst der Albulatunnel der Rh.B. 5865 m). Wie dem Plan Abb. 4 (Seite 244) zu entnehmen, hat er 2 % , bzw. 13 m einseitiges Gefälle; nur auf etwa 2 km der Länge konnte die Scheitelverkleidung entbehrlich werden. Erwähnt sei noch, dass für seine max. Wasserführung von $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ anschliessend an die Fassung der Grossen Melchaa eine Entsandungs-Anlage nach System Dufour eingebaut worden ist. Ueber den interessanten Stollenbau berichtete ausführlich Ing. Dr. E. Wiesmann in «Hoch- und Tiefbau» (1931), auf welche Veröffentlichung Tunnelbauer hingewiesen seien. Einem weiteren Bericht von Ing. Fr. X. Andres, Obering. der C.K.W., in «Schweiz. Wasser- und Energiewirtschaft» 1932, Nr. 11, entnehmen wir noch folgendes:

«Der Stollen liegt im Kalkgebirge, auf der Ostseite hauptsächlich im weichern Valangienkalk und auf der Westseite vornehmlich im harten Kieselkalk. Die Lagerung der Schichten und die allgemeinen hydrographischen Verhältnisse des durchfahrenen Gebirges liessen im Stollen ziemlich viel Wasser erwarten (rechnete man doch beidseits mit bis 50 l/sec), die grosse Ueberlagerung von über 1000 m hohe Temperaturen (bis 26°C), und der allgemeine Gesteinscharakter das Auftreten von Grubengas.

Diese Prognosen haben sich während des Baues in ganz verschiedener Weise erwährt. Die Wassereinbrüche blieben stark hinter den Erwartungen zurück; auf der Ostseite betrug die Gesamtwassermenge unmittelbar nach dem Durchschlag 11 l/sec , und auf der Westseite 30 l/sec (zeitweise stiegen diese Wassermengen noch etwas höher). Unter den Wassereinsickerungen befanden sich zahlreiche schwefelhaltige Quellen. Auch die Gesteinstemperatur blieb unter der berechneten: statt 26° wurden im Maximum 18°C gemessen. Dagegen war das Auftreten von Grubengas (Methan) weit häufiger und intensiver als erwartet, namentlich auf der Ostseite. Hier führten die Gasausbrüche sogar zu vorübergehender Einstellung der Arbeit, die erst nach Verstärkung der Ventilationseinrichtungen auf $2 \text{ m}^3/\text{sec}$ Frischluft wieder aufgenommen werden konnte, während das Gas auf der Westseite nur vereinzelt auftrat.

Das Auftreten von Grubengas, das mit Luft gemischt sehr explosionsgefährlich ist und in den Kohlengruben die berüchtigten schlagenden Wetter erzeugt, ist in diesem Umfang bei uns ein Novum im Bau von Wasserstollen, und die Gasaus-

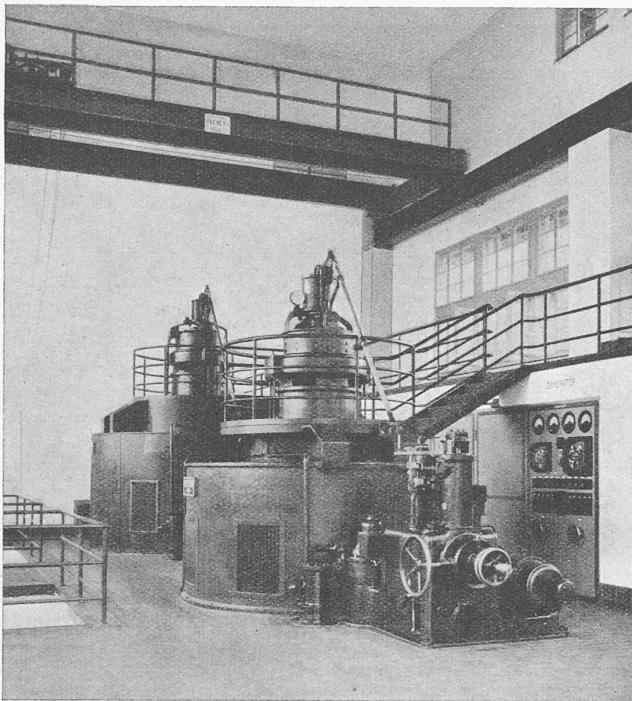


Abb. 15. Zentrale Kaiserstuhl (4000/10 000 PS), mit Oerlikon-Generatoren

die Druck-Setzungs-Diagramme ermittelt und für die Porenziffer ε die bekannte Beziehung gefunden

$$\varepsilon = -C \ln(p + p_c) - \beta(p + p_c) + C_1 = \frac{n}{1-n} \quad (5)$$

n = Porenvolumen; p, p_c = Bodenbelastungswerte in kg/cm^2 ; C = bodenphysikalische Kennziffer; $1/n$ = Verdichtungswert des Bodens.

Der Verdichtungswert $1/n$ schwankte zwischen 8,0 bis 8,06; der Wert 8 lässt auf kalkiges Material mit tonig-organischen Beimischungen schliessen. Die Porenziffer 0,78 bis 0,96 lässt ebenfalls auf Material mit tonigem Charakter schliessen. Trotzdem der Kompressibilitätsversuch mit dem Material im Modell so durchgeführt wurde, dass das Material seitlich nicht entweichen konnte, ergaben sich an den relativ ungestörten Bodenproben merkliche Zusammendrückungen. Das Bachschuttmaterial ist auch heute noch ziemlich locker gelagert.

Wird für das Schuttkegelmateriale Quasi-Isotropie vorausgesetzt, so kann das noch mögliche Zusammensinken (s) des heute trockenen Deltas infolge Eigengewicht berechnet werden.

$$s = \int_0^z \varepsilon dz = \int_0^z \frac{\sigma}{M_B} dz; s = \sum \frac{\alpha}{1 + \varepsilon_m} p_m dz = v F_0 \quad (6)$$

worin z = Mächtigkeit des Materials; ε = Porenziffer;

$$v = \text{Verfestigungsbeiwert}; \alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta p}$$

M_B = Zusammendrückungsmodul; p = Bodenbelastungswert in kg/cm^2 .

Aus obiger Formel ergibt sich die Beziehung gemäss Abb. 10. Es sind dies Endwerte, d. h. sie entsprechen maximaler Zusammendrückungsmöglichkeit des Bachschuttmaterials.

Der Einfluss des Zeitfaktors (t) auf die Senkung (s) kann nach der Formel für kohärente Böden angenähert berechnet werden:

$$s_t = \frac{\alpha}{1 + \varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} (q_0 + q_u) h - \int_{\beta=0}^{z=h} w(z_t) dz \right\} = \mu v F_0 \quad (7)$$

Es bedeutet: ε = Porenziffer, $\frac{\alpha}{1 + \varepsilon} = v$ = spez. Wasserverlust, q_0 = Bodenbelastung an der Oberfläche des betrachteten Elementes der Höhe h , q_u = Bodenbelastung an dessen Unterfläche, $w(z_t)$ = hydrostatischer Ueberdruck in der Tiefe z zur Zeit t , μ = Verfestigungsgrad.

$F_0 = \frac{1}{2} (q_0 + q_u) h$. — Für $\mu = 1$ wird $s = v F_0$, vergl. Formel 6.

Für das Eibachschuttmaterial gilt angenähert die Beziehung:

$$\mu = 1 - \frac{2}{3} e^{-\left(\frac{3 c t}{h^2} - \frac{1}{4}\right)} \quad (8)$$

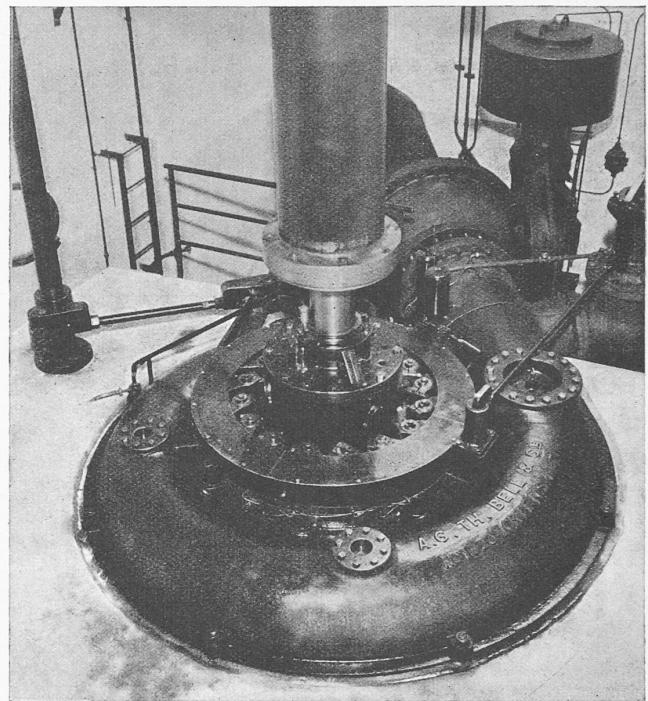


Abb. 16. Spiral-Francis-Turbine 10000 PS der A. G. Th. Bell & Cie., Kriens

worin $c = \frac{k}{\gamma v}$; k = Durchlässigkeitsziffer in mm/s und γ = Raumgewicht in g/cm^3 .

Da das Material des Eibachschuttkegels tonhaltig ist und Beimischungen von organischer Substanz enthält, wird k klein. Versuchstechnisch ergab sich k im Mittel zu

$$k = 5,5 \times 10^{-6} \text{ mm}/\text{s}$$

Für die Zeitperioden $t = 25,50$ und 90 Jahre und für die verschiedenen Mächtigkeiten $h = 15, 25, 30$ und 60 Meter wurden mit Hilfe der Formeln 7 und 8 die Senkungen (s_t) gemäss Abb. 11 errechnet.

Diese Werte sind unter der Annahme errechnet worden, dass Quasi-Isotropie des Bodens vorhanden sei. — Um festzustellen, ob die rechnerisch ermittelten Zahlenwerte der Setzungs-Abnahme im Alter mit der Wirklichkeit übereinstimmen, wurde aus Eibachmaterial in einem Betonbassin von 7×7 m Grundfläche ein künstliches Delta erstellt. Dabei sorgte man dafür, dass die Kornzusammensetzung im künstlichen Delta jener des natürlichen Eibachschuttkegels entsprach, auch wurde sie laufend kontrolliert; ebenso wurde die Dichte, die Art der Ablagerung usw. scharf beobachtet. Nachdem der künstliche Schuttkegel einige Zeit ruhengelassen worden war, wurde das Betonbassin in Zwischenräumen von je 2 bis 3 Wochen jeweils geleert und wieder mit Wasser gefüllt (Abb. 12). Ueber den Schuttkegel wurden 21 Messpunkte nach einem bestimmten Koordinatensystem gelegt und die vertikalen und die horizontalen Verschiebungen der Fixpunkte ermittelt. Die Messergebnisse sind in Abb. 12 wiedergegeben. Deutlich sichtbar ist die verzögernde Wirkung der Setzungerscheinung, sobald das Bassin mit Wasser gefüllt wird. Ebenso ist die starke Abnahme der absoluten Größe der Setzung, nachdem das Versuchsbassin verschiedene Male gefüllt und entleert worden war, deutlich zu erkennen. Die Versuche zeigen deutlich das qualitative Verhalten eines Schuttkegels bei wechselndem Wasserstand; der Zusammenhang quantitativer Art zwischen Modellversuch und Natur ist hier nicht weiter diskutiert.

In Abb. 13 ist graphisch dargestellt, wie die Oberfläche des Eibachschuttkegels sich gesenkt hätte ohne Stauseebetrieb (Fläche A). Die Fläche B gibt die Größe der Senkungen wieder, die auf Grund der oben beschriebenen Versuche errechnet wurden.

Art der jährlichen Bewegungen der Fixpunkte

Während 19 Monaten führte man in der Natur sechs Präzisionsnivellierungen durch, um die Einwirkungen des Füllens und Entleeren des Lungernsees auf die Art der Bewegung der Fixpunkte studieren zu können. Abb. 14 zeigt am Beispiel des Fixpunktes 31, dass die Bewegungsart durch den Stauseebetrieb mit Absenken und Heben um jeweils 30 m stark beeinflusst