Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 83 (1965)
Heft: 42: Prof. G. Schnitter zum 65. Geburtstag, 1. Heft

Artikel: Comportamento della diga di Valle di Lei
Autor: Marcello, Claudio
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-68288

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: 12.07.2025

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

Der Ingenieur findet seine hohe Befriedigung in seiner Arbeit aber nicht nur dank dem Wissen um dieses grössere Ganze, sondern in der Erfüllung der Aufgabe an sich. Sie gibt ihm Gelegenheit, seine schöpferische Begabung zu entfalten, kühnen Ideen konkrete Gestalt zu geben und die Kräfte der Natur in seine Gewalt zu zwingen und dem Menschen dienstbar zu machen. Der Jahr für Jahr sich erneuenden Schar angehender Ingenieure eine solide wissenschaftliche Ausbildung zu vermitteln und ihnen den Sinn für die Verantwortung zu wecken, die sie dereinst bei der Errichtung ihrer Werke der Allgemeinheit gegenüber zu übernehmen haben werden, und in ihnen ein hohes Berufsethos lebendig werden zu lassen, ist die schöne und edle Aufgabe und Verpflichtung des akademischen Lehrers. Wir beglückwünschen den Jubilar, Prof. Schnitter, zu seiner so reichen Tätigkeit und wünschen, dass es ihm vergönnt sein wird, während der ihm noch verbleibenden Jahre des Lehramtes sie mit ebenso ausgezeichnetem Erfolg auszuüben wie bis anhin.

Eingang des Manuskripts: 7. Juli 1965.

Adresse des Verfassers: Dr. *Robert Ruckli*, Direktor des ASF, 3003 Bern, Monbijoustrasse 40.

Comportamento della diga di Valle di Lei

DK 627.825.7.004

Dott. Ing. **Claudio Marcello**, Milano

1. Descrizione dell'opera

La diga sul Reno di Lei crea il serbatoio di testa (avente una capacità di circa 200 milioni di m^3) della catena di impianti della Kraftwerke Hinterrhein AG sul Reno Posteriore[1]). Essa è stata progettata dalla Direzione Costruzioni Impianti Idroelettrici del Gruppo Edison sotto la guida dell' autore, e costruita dall'Impresa GI. LO. VAL. nel periodo 1958–1961; è una struttura ad arco a doppia curvatura avente le seguenti dimensioni principali (fig. 1 e 2):

Altezza dal punto più depresso delle fondazioni al coronamento	143 m
Corda dell'arco di coronamento	538 m
Sviluppo dell'arco di coronamento	690 m
Freccia dell'arco di coronamento	178 m
Spessore max. sulle fondazioni	28 m
Spessore min. al coronamento	16,50 m
Volume della diga	850000 m^3

Per le sue dimensioni, ed in particolare per il valore della corda, la diga del Reno di Lei è fra le più ampie dighe a volta del mondo. La particolare forma della diga è stata suggerita da criteri economici e statici. Pur rispettando il vincolo di mantenere uno spessore minimo non inferiore a m 16,50 (vincolo imposto dalle Autorità Militari Elvetiche), la volta progettata presenta infatti il minimo volume rispetto ad altre soluzioni possibili.

Gli archi orizzontali sono ad asse parabolico ed a spessore costante. Il tracciato parabolico degli archi si adatta alle funicolari del carico sopportata dagli archi stessi: difatti la forma a V molto aperto della vallata fa sì che le mensole laterali, data la loro altezza limitata ed il loro forte spessore, siano notevolmente rigide ed assorbano quindi una ingente aliquota del carico idrostatico, mentre le mensole centrali, molto alte e mediamente non molto più spesse delle altre, sono assai più flessibili e conseguentemente assorbono un'aliquota proporzionalmente minore del carico idrostatico. Di conseguenza il carico gravante sugli archi è massimo al centro e va diminuendo via via che si prodece verso le imposte, e la funicolare del carico corrispondente ha quindi raggio di curvatura minimo al centro e via via crescente verso le imposte. Praticamente tale funicolare coincide per ogni arco con una parabola.

Le mensole presentano una accentuata seconda curvatura, con strapiombi considerevoli tanto verso valle (strapiombo max. dell'ordine di 26 m) quanto verso monte (strapiombo max. dell'ordine di 8m). Lo strapiombo della diga verso valle consente di ridurre le tensioni di trazione in senso verticale che appaiono sul paramento di valle, in conseguenza della notevole rigidità dell'arco di coronamento, e, insieme ai controstrapiombi verso monte che appaiono nella parte più profonda della volta, consente di mantenere soddisfacentemente centrate anche le curve delle pressioni delle varie mensole. La diga viene così a partecipare da un lato, per il favorevole sfruttamento dell'effetto peso, del tipo ad arco – gravità; dall'altro, per gli spessori medi ridotti e per l'effetto di seconda curvatura delle mensole, del tipo a cupola, realizzando così una felice e razionale sintesi.

La diga è fondata su banchi rocciosi di paragneis e micascisti, aventi un modulo elastico (dopo iniezione con miscela cementizia) di circa 100000 kg/cm [2]); essa è stata realizzata in calcestruzzo con inerti calcarei e cemento «Pozzolanico Mare 550»[3]) in dose variabile da 230 a 275 kg/m^3; il modulo elastico del calcestruzzo in questione, a maturazione completa, è di circa 350000 kg/cm^2. Per la costruzione la diga è stata divisa in 54 conci, separati da giunti radiali distanti (sull'asse del coronamento) 12 m l'uno dall'altro; il calcestruzzo è stato refrigerato a mezzo di serpentine annegate nei getti e percorse da una circolazione di acqua fredda.

L'escursione del livello nel serbatoio può andare dalla soglia dell'opera di presa (1821, 88 m s. m.) al coronamento (1932, 00 m s. m.). Data la quota elevata, la diga è soggetta altresì a notevoli variazioni termiche stagionali.

2. Strumenti installati sull'opera

L'importanza e la mole dell'opera hanno imposto l'adozione di un'adeguata rete di strumenti di misura, attraverso la quale esercitare quei controlli che consentono: a) la verifica delle ipotesi di calcolo e la conferma di prove eseguite su modello, b) la sorveglianza del comportamento dell'opera in esercizio.

Ne è risultato un piano di misure di vaste proporzioni, per la cui realizzazione è stato necessario mettere in opera, nelle parti più significative della diga, un elevato numero di strumenti. Il piano delle misure si articola attraverso:

2. I. La misura delle sottopressioni
2. II. La misura degli spostamenti della diga
2. III. La misura delle rotazioni della diga e della roccia di fondazione
2. IV. La misura delle deformazioni della roccia di fondazione
2. V. La misura delle deformazioni del calcestruzzo, della dilatazione dei giunti, delle temperature del calcestruzzo e della roccia di fondazione.

2. I. *Misura delle sottopressioni*

Per la misura delle sottopressioni sono stati installati nei 17 conci centrali della diga n. 71 piezometri idraulici. In ciascun concio sono ubicati 4 apparecchi, ad eccezione del concio centrale ove ne sono installati 7. I piezometri sono costituiti da campane, forate, di ferro zincato del diametro di 25 cm, collegate a tubi metallici da 2", 5. Le canne piezometriche fanno capo alle apposite cabinette predisposte lungo il cunicolo perimentrale della diga.

2. *II. Misura degli spostamenti della diga*

2. II. 1. Misura degli spostamenti orizzontali

Sono stati adottati tre sistemi di misura e precisamente: a) sistema di misura con pendolo, b) sistema di misura per triangolazione geodetica, c) sistema di misura per collimazione.

a) Sistema di misura con pendolo. Ai fini di mettere in evidenza le correlazioni esistenti tra gli spostamenti orizzontali della diga e le due azioni predominanti: spinta idrostatica e temperature del calcestruzzo, sono stati installati numerosi fili a piombo. Gli apparecchi sono stati posti in opera nella sezione di chiave (concio 1) ed in quelle alle reni (conci 13 destro e 13 sinistro) in modo da realizzare 3 vertici di misura (fig. 1). Ogni verticale risulta costituita da più pendoli disposti in cascata, l'ultimo dei quali si sviluppa in un pozzo in roccia, della profondità di 25 m, praticato al di sotto della sezione di fondazione. Complessivamente sono stati installati 14 fili a piombo per la misura degli spostamenti relativi di 39 punti della struttura; da questi, con facili calcolazioni, vengono determinati quelli assoluti ritenendo fisso, per ciascuna verticale, il punto più profondo del pozzo in roccia.

b) Sistema di misura per triangolazione geodetica. La rete di triangolazione (fig. 1) si articola a valle della diga su 12 pilastri, solo alcuni dei quali sono fondati su roccia sana e stabile. Essa è orientata

[1]) Vedi: *L. Kalt*, Die Kraftwerkgruppe Valle di Lei-Hinterrhein, SBZ 1957, Nr. 5 e 6, pag. 65 e 79.

[2]) Si veda più oltre per la deduzione di questo valore dalla misura delle deformazioni della roccia.

[3]) Cemento pozzolanico (35 % pozzolana) con resistenza a compressione della malta normale italiana superiore a 550 kg/cm^2.

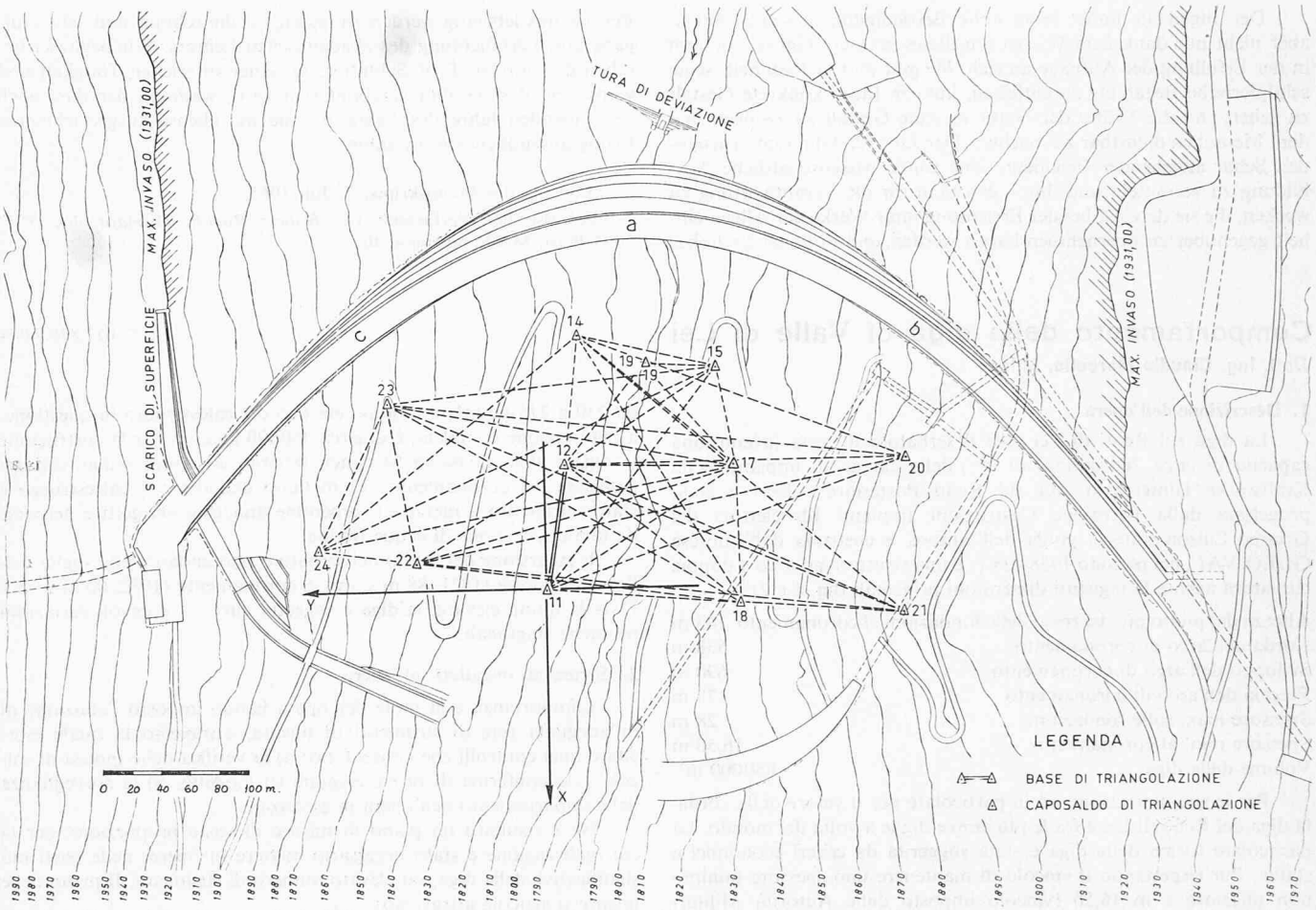


Fig. 1. Pianta della diga, scala 1:5000, con schema planimetrico della triangolazione. a = concio 1, b = concio 13 sinistro, c = concio 13 destro

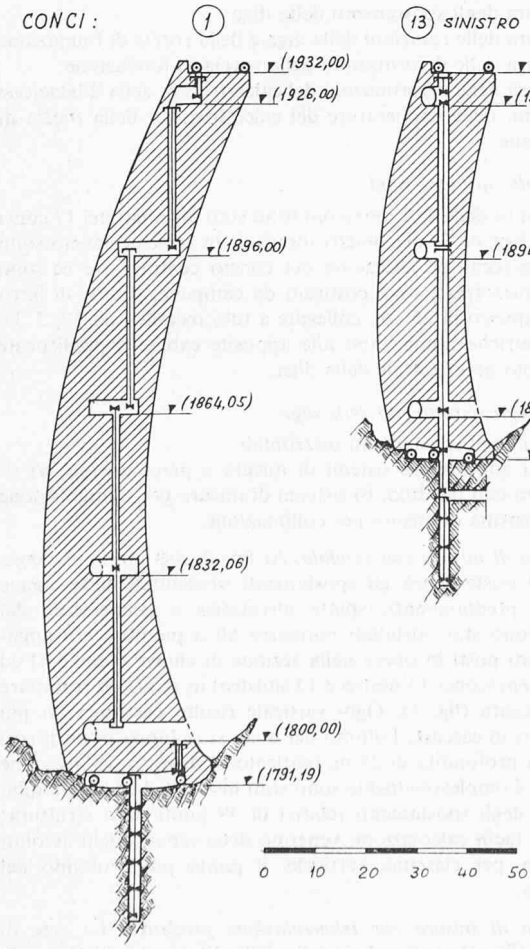


Fig. 2. Sezioni verticali: concio 1 (chiave) e concio 13 sinistro. Installazione dei pendoli. Scala 1:1500

ad un segnale lontano, posto su di un roccione sicuramente fisso. ad una distanza di 500 m circa, più a valle. Il vertice che rappresenta l'origine degli assi di riferimento, è quello contrassegnato con il numero 11. La base della triangolazione coincide con il lato 11–12 ed un basimetro a postazione fissa di tipo bimetallico ne consente la misura diretta delle variazioni di lunghezza. Un secondo basimetro del medesimo tipo collega il piede del conico centrale con il pilastro n. 19. Le direzioni misurate sono quelle che collegano reciprocamente tutti i vertici più la direzione al punto lontano di orientamento, per un totale di 78. Da tutti i vertici della triangolazione, escluso il n. 19, si effettuano i puntamenti ai 29 segnalini sul paramento di valle della diga. I loro spostamenti vengono determinati per intersezione dirette multiple, in generale quadruple ed in alcuni casi quintuple.

c) *Sistema di misura per collimazione.* Con una collimazione geodetica si determinano gli spostamenti orizzontali di 3 punti del coronamento, materializzati in chiave ed alle reni, da altrettante postazioni per mira mobile. I piani di riferimento sono tre; uno per ciascun punto. Il primo individuato da un pilastro per collimatore in sponda destra e da una mira fissa dalla parte opposta, viene utilizzato per la chiave; gli altri due, praticamente coincidenti – recando ciascun pilastro la mira fissa collimabile dall'altro – per le reni.

2. II. 2. Misura degli spostamenti verticali

Per determinare gli spostamenti verticali di numerosi punti della struttura, sono state istituite lungo i cunicoli orizzontali della diga cinque linee di livellazione. Quattro di queste interessano, rispettivamente, i cunicoli longitudinali alle quote: 1926, 1896, 1864, 1832, la quinta il cunicolo trasversale del concio 1 alla quota 1800.

Le singole livellazioni testè citate sono collegate all'esterno a numerosi caposaldi di riferimento; complessivamente sono stati messi in opera 160 capisaldi (83 solidali alla diga, 77 esterni) su di un percorso totale di livellazioni di 3500 m.

Il metodo di determinazione adottato è quello della livellazione geometrica di alta precisione; poichè non è possibile eseguire le singole livellazioni su percorsi chiusi, vengono compiute in andata e ritorno. I risultati sono considerati validi quando i singoli dislivelli misurati tra due caposaldi successivi in andata e ritorno differiscono

come massimo di $\pm$ 0,1 mm e si mantiene costante, nel tempo, il dislivello misurato tra i due capisaldi esterni di partenze e di arrivo dei singoli percorsi.

Viene eseguita inoltre, in condizioni particolari di invaso, una livellazione a monte della diga, per controllare gli spostamenti verticali del fondo del bacino; questa livellazione, lunga 7 km, si articola su 69 capisaldi.

2. *III. Misura delle rotazioni della diga e della roccia di fondazione*

Sono stati adottati due sistemi di misura e precisamente: a) Sistema di misura mediante clinometro, b) Sistema di misura mediante livellazione.

a) Sistema di misura mediante clinometro. Nei conci 1–13 destro e 13 sinistro (Fig. 2) sono state installate complessivamente 80 postazioni clinometriche, per la misura delle rotazioni secondo le direzioni radiale e tangenziale. Di queste postazioni 30 interessano, nei pozzi in roccia, la fondazione.

b) Sistema di misura mediante livellazione. Le rotazioni della roccia di fondazione, secondo la direzione radiale, vengono ottenute anche tramite i dislivelli misurati su tre coppie di capisaldi ubicati in corrispondenza dei paramenti di monte e di valle sul coronamento e su 3 terne di capisaldi nei cunicoli radiali di fondazione, sui conci 1–13 d – 13 s.

2. *IV. Misura delle deformazioni della roccia di fondazione*

Gli strumenti per la determinazione di tali deformazioni sono stati concentrati, per la quasi totalità, nei pozzi in roccia dei conci 1–13 d – 13 s, all'uopo predisposti. Gli schiacciamenti si determinano con un calibro estensimetrico su 94 postazioni disposte lungo le pareti dei pozzi, su quattro verticali nelle posizioni: Destra, Sinistra, Monte, Valle. Inoltre tramite 14 termoestensimetri, installati in appositi fori da sonda, si determina lo stato di compressione della roccia del bacino in prossimità della diga e di quella sottostante le estremità di monte e di valle del concio centrale.

2. *V. Misura delle deformazioni del calcestruzzo, delle dilatazioni dei giunti, delle temperature del calcestruzzo e della roccia di fondazione*

2. V. 1. Misura delle deformazioni del calcestruzzo

Sono stati impiegati termoestensimetri elettrici a variazione di resistenza, disposti in modo da consentire il controllo di 3 mensole e quattro archi della struttura. Le mensole sono quelle corrispondenti ai conci numerati: 1–10 d – 10 s; gli archi quelli alle quote 1930, 1880, 1845 e 1810.

I posti di misura sono complessivamente 34, dei quali 28 ad una distanza di 1 m dai paramenti e 6 in asse alle mensole. In ciascuno dei posti di misura del concio 1 e della parte destra della diga (20 posti) sono stati installati 9 apparecchi disposti a stella; nei 14 restanti, rosette di quattro. In vicinanza di ogni stella di 9 estensimetri sono stati installati 2 apparecchi isolati; presso ciascuna rosetta di 4 estensimetri si è installato un solo apparecchio isolato. In totale sono stati messi in opera 290 termoestensimetri, 54 dei quali isolati.

2. V. 2. Misura della dilatazione dei giunti

Sui giunti posti dalle due parti della chiave e distanti da essa 18 e 54 m circa, alle quote degli archi 1930, 1880, 1845, si procede al rilievo delle dilatazioni verso il paramento di monte. A questo scopo vengono impiegati 12 dilatometri elettrici a variazione di resistenza. I movimenti dei giunti vengono inoltre osservati lungo tutti i cunicoli di ispezione, misurando, per mezzo di un calibro removibile, la distanza tra sedi metalliche poste a cavaliere del giunto. Le postazioni di misura di questo tipo assommano a 175.

2. V. 3. Rilievi della temperatura

a) Nel calcestruzzo. Per poter seguire lo sviluppo del calore di presa del cemento ed il raffreddamento del calcestruzzo sono stati installati 248 termometri elettrici, localizzati su 23 sezioni di misura. Altre 98 termosonde sono state messe in opera su un certo numero di sezioni dei conci 1–10 d – 10 s per rilevare le variazioni termiche prodotte nel corpo della diga, nel corso degli anni, dai cicli stagionali delle temperature. Non è stato necessario porre in opera un maggior numero di termometri, potendo contare sulle temperature fornite dai 290 termoestensimetri di cui si è detto precedentemente.

b) Nella fondazione. Ai piedi dei conci 1–10 d – 10 s sono stati posti in opera 29 termosonde, 16 di queste sono disposte da monte a valle secondo la superficie di contatto calcestruzzo roccia, le rimanenti a diverse profondità della fondazione entro fori da sonda.

c) Nell'acqua del serbatoio. Le temperature dell'acqua del serbatoio, a diverse profondità, vengono rilevate da 6 termometri elettrici allogati in chiave sul paramento di monte a quote diverse.

d) In aria. Le temperature dell'aria vengono misurate da tre termometri elettrici sistemati, in chiave, sul paramento di valle.

3. I risultati delle misure sulla roccia

Una descrizione completa dei risultati delle misure ottenuti a tutt'oggi esorbita dal quadro della presente relazione. Fra le numerose misure eseguite sulla roccia di fondazione riportiamo quelle relative agli affondamenti (spostamenti verticali) prodotti dal peso proprio crescente in fase di costruzione sopra il concio centrale. Constatata la stretta correlazione esistente tra detti affondamenti e peso della costruzione sovrastante (nonchè tra rotazioni e momenti flettenti della massa di calcestruzzo insistente sulla fondazione rispetto al baricentro della sezione di base) si è ravvisata l'opportunità di elaborare queste misure al fine di ricavare una stima del modulo elastico globale E_r della roccia.

Si è fatto riferimento alla nota teoria del Boussinesq secondo cui l'affondamento in un punto alla superficie (supposta orizzontale e piana) di un semispazio omogeneo isotropo di modulo elastico E_r e di rapporto di Poisson ν, vale:

$$v = \frac{1 - \nu^2}{\pi E_r} \cdot \int \frac{dP}{r}$$

ove dP è il carico elementare agente sull'elemento di superficie che dista r dal punto considerato.

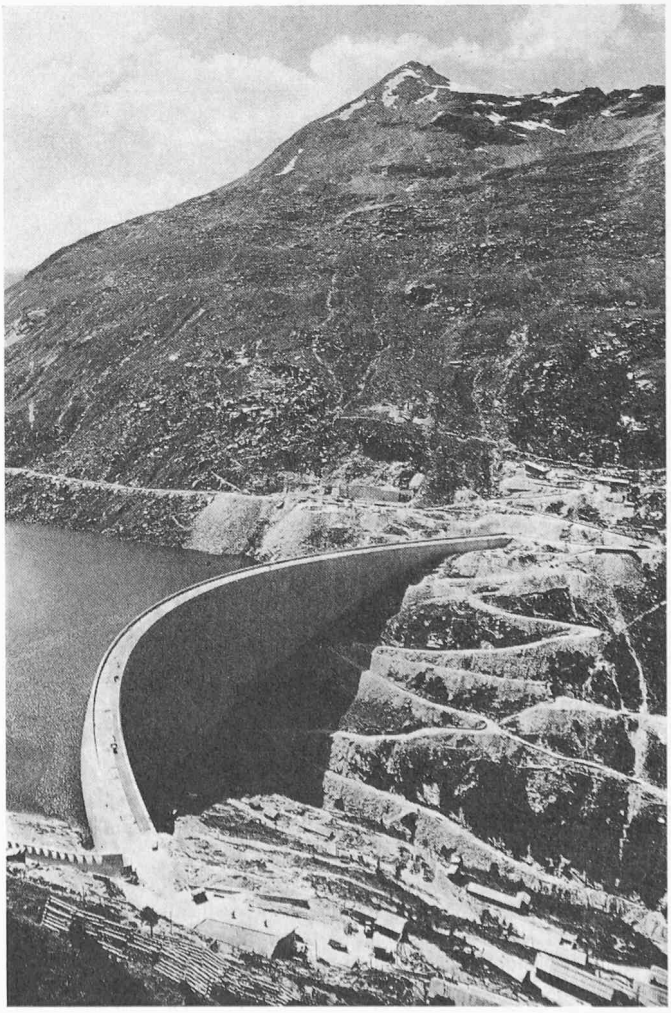
Ad esempio per un'altezza della costruzione cui corrisponde una pressione media di 180 t/m², si è registrato un affondamento medio di 6,5 mm (ved. fig. 4a). Considerando che i contributi dovuti ai conci laterali oltre il 3 destro ed il 3 sinistro sono certamente trascurabili, e facendo pertanto intervenire nel calcolo i pesi dei soli conci 1–2d–2s–3d–3s, dal diagramma di fig. 4b e relative formule si ricava

$$E_r = 2 \cdot \frac{1 - \nu^2}{\pi v} \cdot p \cdot a \cdot \eta_1 =$$

$$= \frac{0{,}98 \times 2}{3{,}14 \times 6{,}5 \times 10^{-3}} \cdot 1{,}80 \times 10^2 \times 28 \times 1{,}95 = 0{,}944 \cdot 10^6 \text{ t/m}^2$$

$$= 94\,400 \text{ kg/cm}^2$$

Fig. 3. Diga vista da valle



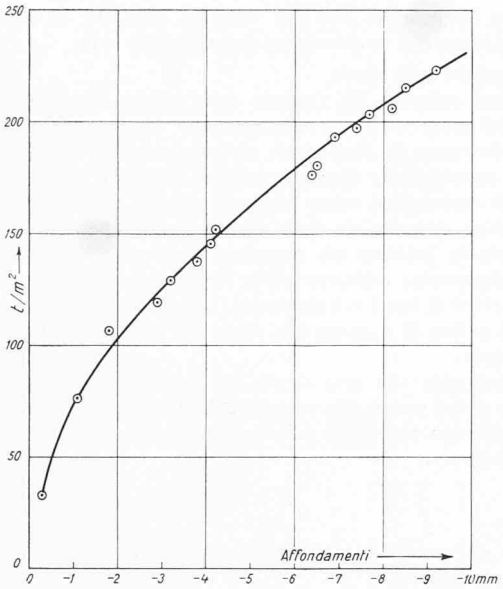


Fig. 4a. Diagramma degli affondamenti della roccia. Correlazione tra affondamenti medi e pressioni di peso proprio

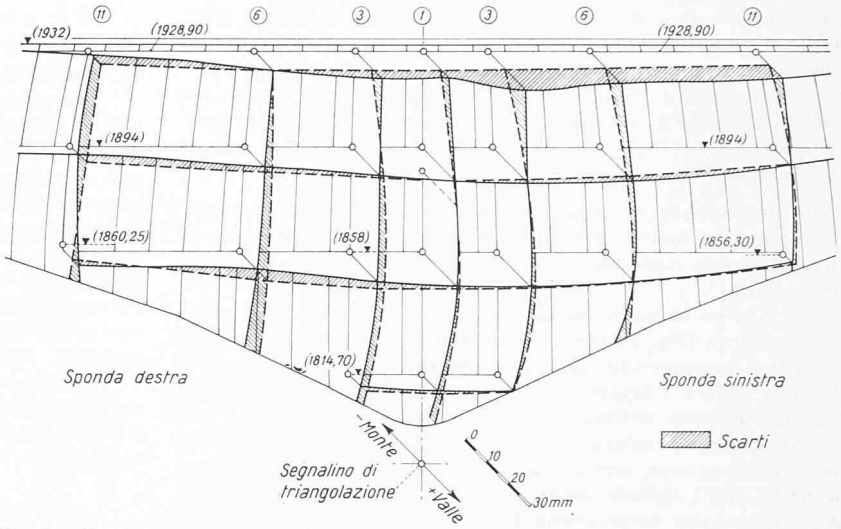
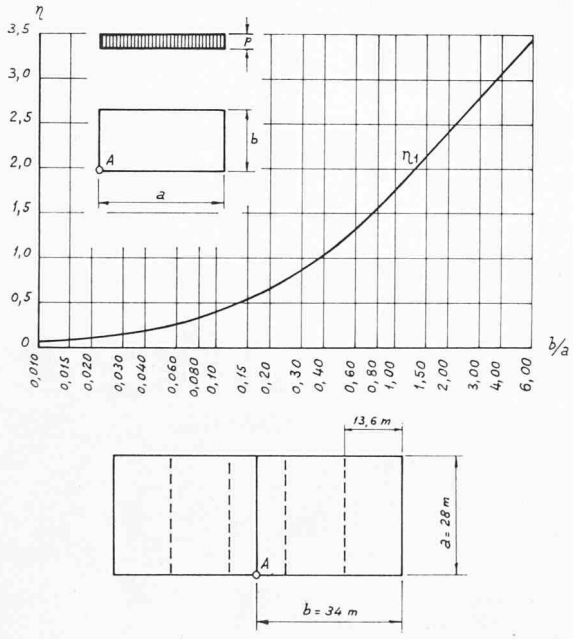


Fig. 5. Confronto tra spostamenti teorici e spostamenti misurati nel periodo del 9 maggio al 19 ottobre 1961



$$E_r = 2\,\frac{1-\nu^2}{\pi\,\nu}\,p\cdot a\cdot\eta_1 = 2\,\frac{0{,}98}{3{,}14\times 6{,}5\times 10^{-3}}\;1{,}8\times 10^2\times 28\times 1{,}95 = 0{,}944\times 10^6\ t/m^2$$

Fig. 4b. Diagramma degli affondamenti della roccia. Affondamento sotto il concio centrale per effetto del peso proprio

Un analogo procedimento applicato ad altri punti situati in posizione laterale in sponda destra ed in sponda sinistra ha consentito di mettere in luce una sensibile disparità dei valori del modulo elastico dell'una e dell'altra sponda della valle, pur rimanendo il valor medio complessivo prossimo a 10^6 t/m² = 100 000 kg/cm².

4. Esame statico della volta

Il comportamento della diga sotto carico fu studiato mediante due differenti metodi di calcolo e altresì con prove su modello, svolte queste ultime presso l'Istituto specializzato I.S.M.E.S. di Bergamo su due grandi modelli in scala 1:66,6.

In un primo calcolo venne applicato un metodo che si ispirava al Trial Load Method, opportunamente semplificato ed adattato al caso di archi ad asse parabolico. Questo calcolo, che teneva conto soltanto di spostamenti e di azioni radiali, dette risultati soddisfacenti nella zona centrale della volta; nella zona perimetrale le particolari ipotesi di partenza conducevano a valori meno convincenti. Le prove su modello confermarono le tensioni trovate nella zona centrale e fornirono un quadro soddisfacente anche per la zona perimetrale dove il calcolo incontra inevitabilmente manifeste limitazioni.

Venne in seguito condotto un secondo[4]), basato su una applicazione originale del principio della minima energia potenziale totale, in cui la diga veniva considerata come una piastra curva. In un primo momento il perfezionamento introdotto con questo metodo consisteva soltanto nel mettere in conto, oltre ai contributi d'arco e di mensola, anche quello di torsione; il metodo venne poi affinato in diverse riprese, sino alla versione attuale, in cui esso tiene conto del contributo d'arco (con sforzo normale variabile dalla chiave alle imposte, progresso questo di grande importanza teorica), di mensola, torsionale e di scorrimento; esso rispetta la perfetta congruenza degli spostamenti radiali e tangenziali, nonchè delle rotazioni ad asse verticale. La versione di questo calcolo limitata a dighe geometricamente e fisicamente simmetriche è stata resa interamente automatica per l'effettuazione su calcolatrice elettronica «Remington UNIVAC SS» a cura del Centro Meccanografico del Gruppo Edison (ora ENEL).

Lo stesso programma di calcolo può essere sfruttato, mutando i dati d'ingresso, per l'analisi di una situazione statica o termica qualsiasi. Per affrancarsi, tuttavia, dalla necessità di effettuare ogni volta il calcolo specifico relativo al particolare caso da esaminare, si sono effettuati sette calcoli fondamentali relativi a casi-tipo «unitari», ricavando dei coefficienti di influenza mediante i quali, per semplice sovrapposizione degli effetti, si può ricostruire qualsiasi situazione. Il materiale così preparato costituisce un documento permanente di notevole valore, in quanto consente in qualsiasi momento, e con calcoli di grande semplicità, di risalire dai dati che identificano la situazione termica e statica della diga (o meglio le variazioni di questa situazione) ai corrispondenti valori teorici di: spostamenti, dilatazioni, tensioni ecc. Da notare che nel preparare detto materiale di base si è tenuto

$\varrho = \dfrac{E_c}{E_r} = 3{,}5$, in accordo con le risultanze delle prove in situ, che avevano dato in media per E_c il valore E_c = 350000 kg/cm², e per E_r il valore E_r = 100000 kg/cm². Fermo restando il valore scelto per ϱ, l'organizzazione delle tabelle è tale per cui si può tener conto, volendo, di un valore a piacere $E_c \neq 350000$ kg/cm² e di un coefficiente di dilatazione $\alpha \neq 10^{-5}/°C$.

5. Confronti tra calcoli ed osservazioni dirette

a) Periodo 9 *maggio* – 19 *ottobre* 1961

La fig. 5 illustra, per sovrapposizione ed in proiezione assonometrica riferita ad uno sviluppo della superficie mediana della diga, le differenze tra spostamenti radiali misurati e calcolati (questi ultimi interpolati graficamente per passare dai nodi di calcolo ai segnalini

[4]) Sviluppato negli uffici della DC II del Gruppo Edison a cura del dott. ing. *Michele Fanelli*. Si veda in proposito l'articolo: Il calcolodelle dighe a volta qualsiansi col metodo della minima energia potenziale totale, su «L'Energia Elettrica», n. 8, 1962.

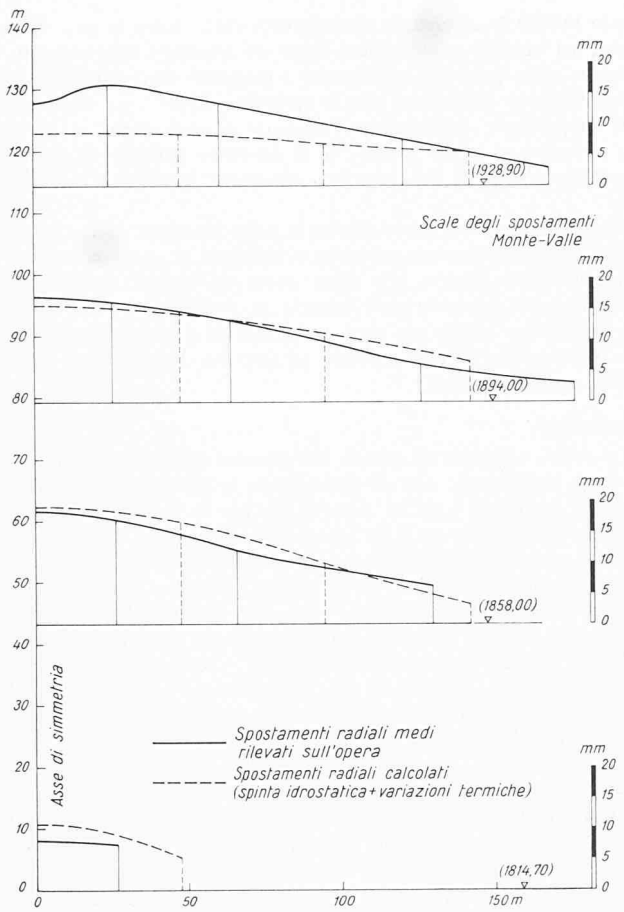


Fig. 6. Confronto tra i valori teorici e la parte simmetrica dei valori misurati, periodo 9 maggio—10 ottobre 1961

di triangolazione). La concordanza tra i due quadri di spostamenti può senz'altro considerarsi soddisfacente, specie per gli archi e le mensole intermedie. Si nota comunque una tendenza ad errori positivi (spostamenti calcolati maggiori di quelli misurati) per la parte destra dell'opera; una tendenza contraria per la parte sinistra. Una gran parte di queste differenze è imputabile al comportamento asimmetrico della diga reale; difatti, ponendo a confronto gli spostamenti calcolati con la media (fra destra e sinistra) di quelli misurati in punti che si corrispondono nella simmetria geometrica rispetto al piano di chiave, le differenze si riducono notevolmente (fig. 6).

Da quest'ultimo confronto emerge, però, un sensibile errore *per difetto* degli spostamenti calcolati (rispetto a quelli misurati) su quasi tutto lo sviluppo dell'arco a quota 1928,90. Le cause di queste discrepanze potrebbero formare oggetto di varie ipotesi, alcune delle quali sono esposte di seguito.

Si può pensare ad esempio che il calcestruzzo della parte superiore della diga, notevolmente meno stagionato della massa sottostante all'epoca delle due triangolazioni, non abbia presentato un comportamento perfettamente elastico, od abbia sovrapposto, alla componente elastica della deformazione, un sensibile effetto di ritiro. La parte più bassa della diga, il cui calcestruzzo fu gettato in media un anno (o più) prima della parte alta, si sarebbe comportata in modo quasi perfettamente elastico. (Queste congetture saranno riprese nel punto b).

L'indagine preliminare ora in esame ha comunque infuso fiducia nell'attitudine dello schema di calcolo adottato a rappresentare (almeno a titolo di «modello matematico semplificato») le vicende termoelastiche della diga, ed ha suggerito di passare ad una elaborazione che abbracciasse (e seguisse nel suo svolgimento) un più considerevole arco di tempo, quale è quella illustrata al punto successivo.

b) Periodo maggio 1961 – *aprile* 1962

Per l'analisi di questo periodo si sono presi in esame i giorni centrali di ognuno dei 12 mesi interessati. Il calcolo è stato limitato agli spostamenti della mensola di chiave, riservandosi di estenderlo eventualmente a quelle laterali in una fase successiva.

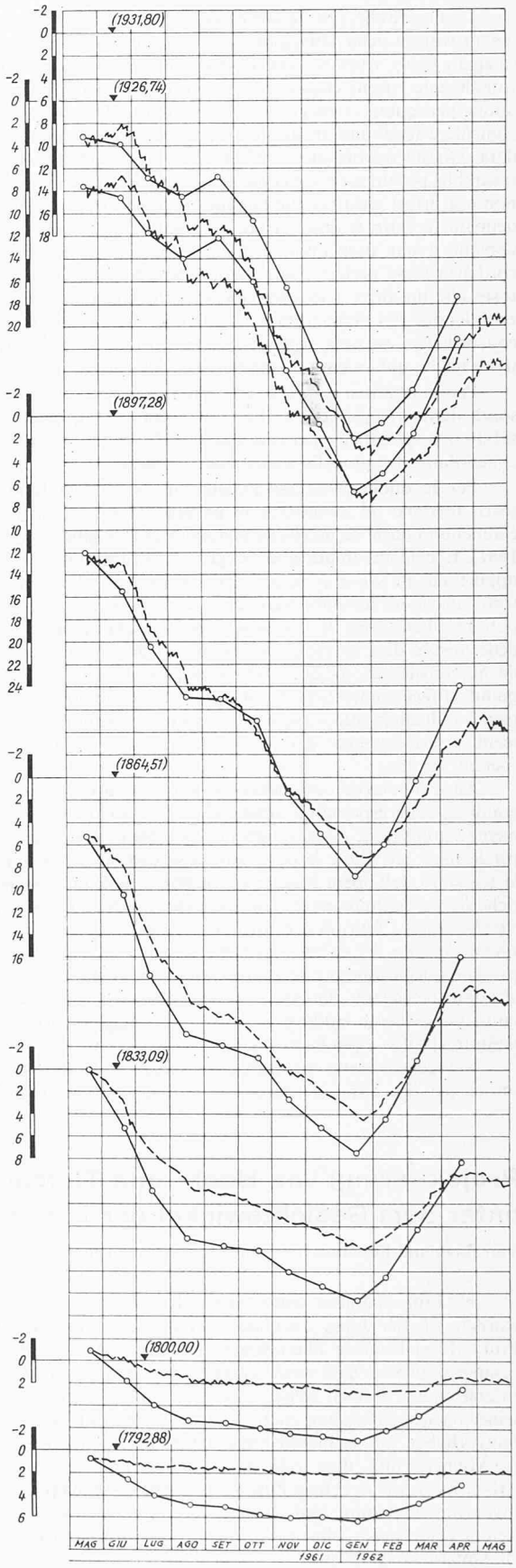


Fig. 7. Confronto tra i spostamenti orizzontali della mensola centrale (misurati e calcolati) nel periodo maggio 1961—aprile 1962
— — — — — valori misurati col pendolo
———— valori calcolati col metodo della minima energia potenziale totale a partire dalle variazioni d'invaso e delle temperature della sezione verticale di chiave
I diagrammi dei valori calcolati sono stati fatti coincidere con quelli dei valori misurati in corrispondenza del mese di maggio

Da notare che, poichè non è noto lo stato assoluto di spostamento della struttura nella situazione assunta come origine delle misurazioni (maggio 1960), i valori calcolati degli spostamenti sono stati convenzionalmente riferiti ciascuno al valore omologo del maggio 1961; e, quota per quota, i diagrammi misurati e calcolati sono stati fatti coincidere (con una traslazione verticale) in corrispondenza di tale data. Questa operazione contiene elementi di arbitrarietà in quanto si sarebbe potuto scegliere come origine qualsiasi altro mese; e, inoltre, non è a priori giustificabile l'assunzione che i due tipi di diagrammi debbano *a tutte le quote* avere un punto in comune, posto che lo abbiano a una data quota z. Comunque è evidente che, se la concordanza fosse perfetta, sarebbe indifferente scegliere un mese piuttosto che un altro, e sarebbe anche lecito far coincidere i punti iniziali dei due tipi di diagrammi a tutte le quote. Se non vi fosse alcuna concordanza, nessuna scelta potrebbe portare a confronti significativi e anche qui vi sarebbe indifferenza nel criterio di partenza.

Perciò *in prima analisi* ci atterremo al criterio alquanto empirico sopra detto, ricavandone la fig. 7. Un esame di questa figura rivela subito una spiccata e – per la quota 1897,28 – addirittura sorprendente concordanza tra modello matematico e realtà.

Per le quote progressivamente più vicine alla fondazione, gli scarti tendono ad aumentare in misura via via più sentita; ma ciò è almeno in parte da ascriversi alla scelta dell'origine comune (maggio 1961). E' evidente infatti che assegnando ad ogni quota l'origine più opportuna gli scarti possono essere ridotti a valori pressochè uniformi in valore assoluto max (circa 2 mm). E questo procedimento potrebbe ben essere lecito, se si considera che la situazione origine delle misure deve essere stata, dal punto di vista statico, perturbata da numerosissime coazioni dovute ai procedimenti di costruzione, e quindi sfugge completamente al calcolo, diventando un dato di riferimento inducibile solo *a posteriori*. Inoltre le origini degli spostamenti, scelte arbitrariamente per le diverse quote, potrebbero non essere coerenti fra loro.

Altre numerose considerazioni scaturiscono dall'esame del diagramma, e ne esponiamo alcune che si possono ritenere particolarmente significative. A quasi tutti i livelli – ma in misura più accentuata per le parti più alte e le parti più basse della diga – è evidentissima la tendenza dell'opera a seguire con buona fedeltà le variazioni teoriche *lente*, a seguire invece con sensibile ritardo le variazioni teoriche *rapide*. Questo fatto non è sorprendente ove si ponga mente all'*elasticità differita* del calcestruzzo. Nella stessa luce può anche trovare parziale spiegazione la discrepanza notata, per l'arco a quota 1928,90, al punto precedente. Questa elasticità differita si manifesta in misura tanto più evidente laddove gli sforzi sono maggiori (base) o dove il modulo elastico è più basso (coronamento).

Nel centro della struttura, viceversa, si hanno le condizioni ottime per una rispondenza con la teoria, ed ivi si risentono anche in minor misura le condizioni al contorno, che – come si sa – sono imposte, nel modello matematico, in modo alquanto approssimato.

Anche nelle parti che presentano i maggiori scarti, tuttavia, si può agevolmente riscontrare che le *variazioni lente* – sia di invaso che di temperatura – producono *variazioni* di spostamenti estremamente prossime ai valori teorici; nè si dovrebbe chiedere di più ad una analisi *elastica* di una struttura altamente iperstatica in calcestruzzo.

Riteniamo pertanto lecito riferire (a parte fenomeni di deriva che solo una analisi pluriennale potrebbe evidenziare in modo completo) le curve teoriche relative alle varie quote ad origini determinate empiricamente *a posteriori* col criterio di minimizzare, ad es. lo scarto quadratico medio tra ogni curva teorica e la corrispondente curva sperimentale (il che equivale ad imporre l'eguaglianza delle rispettive ordinate medie).

6. Conclusioni

Le analisi condotte ed esposte nel presente studio devono intendersi come preliminari; esse nè esauriscono la grande massa di dati accumulati in diversi anni di misura, nè, per le limitate situazioni esaminate, considerano tutti gli aspetti della questione: così si sono lasciati da parte gli spostamenti tangenziali, le deformazioni unitarie (misure estensimetriche) ecc. Tutto questo dovrebbe, in uno studio completo, essere ripreso da un punto di vista più ampio e con strumenti di indagine più adeguati (ad esempio, con un programma dl calcolo per dighe – o situazioni di carico – non simmetriche). Il lavoro svolto, però, costituisce una utile base per ulteriori sviluppi e permette già di indirizzare le linee fondamentali di un'interpretazione razionale delle misure.

In particolare, si è constatato come lo schema di calcolo adottato, pur nella sua limitazione derivante dall'ipotesi di perfetta simmetria della diga e delle azioni esterne, è atto ad interpretare fedelmente il comportamento normale della diga, tanto nella sua componente statica quanto in quella termica. D'altra parte si può concludere che le disposizioni e le procedure di misura predisposte funzionano soddisfacentemente, fornendo un quadro coerente e dettagliato dello stato di deformazione della diga. Si può anche osservare che l'opera funziona, fondamentalmente, nel modo che si era previsto in sede di progetto.

In una prospettiva più generale i presenti risultati incoraggiano circa la possibilità di trovare una interpretazione razionale e quantitativa dei fenomeni che reggono l'effettivo regime statico delle dighe a volta, e spronano a perfezionare i mezzi ed i metodi sin qui impiegati.

Indirizzo dell' autore: Dott. Ing. *Claudio Marcello*, Milano, Via Visconti di Modrone 18.

Projektierung von Hoch- und Tiefbauten unter dem Gesichtswinkel der betriebswirtschaftlichen Ausführungsprobleme

DK 624.003

Von **Raymond Koechlin,** dipl. Ing. ETH, Delegierter des Verwaltungsrates der Aktiengesellschaft Conrad Zschokke

Als Prof. Schnitter seinerzeit Dr. Kaech mitteilte, er sei berufen worden, an der Eidg. Technischen Hochschule die Nachfolge von Prof. Meyer-Peter zu übernehmen und er somit seine aktive Unternehmer-Laufbahn bald werde aufgeben müssen, bemerkte Dr. Kaech: «s'isch einersyts doch schad»! Ja «einerseits», weil Dr. Kaech aus seiner reichen Erfahrung erkannt hatte, wie wichtig es ist, bei grossen Bauvorhaben auf technisch bestens befähigte Unternehmer rechnen zu können, und dass rationelles Bauen und leistungsförderndes Arbeitsklima nur bei enger Zusammenarbeit zwischen projektierendem Ingenieur, Bauleitung und Unternehmer zu erzielen sind. Aber gerade weil es «einerseits» schade war, nicht mehr direkt mit Prof. Schnitter als Unternehmer rechnen zu können, so war es «anderseits» für das gesamte schweizerische Bauwesen von grösster Bedeutung, die Direktion der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau sowie die Professur für Wasserbau und Grundbau an der ETH einem eminenten Ingenieur anzuvertrauen, der sich seine vielseitige Erfahrung als Unternehmer inmitten der Realitäten der Baustelle angeeignet hatte.

In der Tat war niemand besser als Prof. Schnitter in der Lage, der aufkommenden jungen Ingenieur-Generation aus eigener Quelle darzulegen, wie geplant, organisiert und ausgeführt werden muss, um sowohl technisch einwandfrei als auch sparsam zu bauen.

Diese Aufgabe ist für das schweizerische Bauwesen um so wichtiger, als die offenbar in weiten Kreisen unseres Landes herrschende vorgefasste Meinung, unsere Ingenieure und Techniker seien «durch Studium und Praxis zu ökonomischem Bauen erzogen» worden, wie dies vom Bundesrat in seinem Bericht vom 26. Januar 1965[1]) angenommen wird, leider bei weitem nicht zutrifft.

Der qualifizierte Unternehmer muss im Gegenteil immer wieder feststellen, dass viele unserer Architekten und Ingenieure – worunter auch solche, die bestens ausgewiesen sind – schöne Bauwerke projektieren, welche im fertigen Zustande ihrer Bestimmung ausgezeichnet entsprechen, deren Ausführung aber, infolge ihrer Gestaltung und der Programmierung oft zu aufwendig ist und unnötig viele Arbeitskräfte erfordert.

Dieser Umstand, welcher die schweizerische Wirtschaft schon Hunderte von Millionen gekostet und den Fremdarbeiterbedarf nicht unwesentlich gesteigert hat, erscheint unter dem Gesichtspunkte der Konjunkturdämpfung und des Fremdarbeiterabbaues als besonders

[1]) Bericht des Bundesrates an die ständerätliche Kommission über die Entwicklung der Kosten des Nationalstrassenbaues, veröffentlicht im «Bundesblatt» Nr. 7, 117. Jahrgang, 19. Februar 1965.